

## University of Groningen

### Milieu en innovatie

Krozer, Yoram

**IMPORTANT NOTE:** You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

*Document Version*

Publisher's PDF, also known as Version of record

*Publication date:*

2002

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

*Citation for published version (APA):*

Krozer, Y. (2002). *Milieu en innovatie*. s.n.

**Copyright**

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

**Take-down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

### 3. Zijn milieueisen qua kosten aanvaardbaar?

Zijn de milieueisen die de overheid stelt qua kosten voor bedrijven aanvaardbaar? Om deze vraag te beantwoorden moeten overheden en bedrijven de emissiereductiekosten kunnen bepalen, rekening houdend met verschillen in typen bronnen, omvang van emissie en typen milieutechnologie. In dit hoofdstuk wordt nagegaan in hoeverre het mogelijk is om op basis van de gegevens over slechts twee bronnen de kosten bij de diverse andere bronnen in een verzameling te schatten.

#### 3.1 Inleiding

De behoefte bij de overheid aan betrouwbare kostenramingen komt voort uit overwegingen die een rol spelen bij het ambtelijk voorbereiden, hierna het politiek vaststellen en vervolgens het invoeren van milieueisen, zoals bij de richtlijnen van de Europese Unie en tot voor kort in Nederland bij de Nationale Emissie Richtlijn Lucht (NER) voor emissies naar lucht of de CUWVO/CIW-richtlijnen voor emissies naar water. Het uitgangspunt in het beleid is dat milieueisen zo scherp moeten zijn dat de emitterende bedrijven voldoende emissiereductie bereiken om milieuaantasting te voorkomen, maar tevens dat de eisen ook niet weer zo streng mogen zijn dat ze een bedreiging voor de economische ontwikkeling vormen, het zogenoemde Alara-beginsel (*'As Low As Reasonably Achievable'*). De toepassing van het Alara-beginsel bij de voorbereiding van een milieueis houdt in dat hiermee een zodanige emissiereductie wordt bereikt dat schade aan de milieukwaliteit wordt voorkomen terwijl tegelijkertijd de milieukosten die bedrijven moeten maken om aan de eis te voldoen, aanvaardbaar zijn. De milieueis is doorgaans geformuleerd als een maximale concentratie van een stof, dat wil zeggen: de hoeveelheid emissie per hoeveelheid afvoer, zoals afgas. Aangezien de hoeveelheid afvoer per emissiebron sterk uiteenloopt naar gelang de omvang van de productie en typen productietechniek, moet de overheid rekening houden met een spreiding van emissieomvang en milieukosten per bron, ook al wordt de eis aan goed vergelijkbare typen bedrijven gesteld, bijvoorbeeld binnen één branche. Aldus moet de overheid rekening houden met de verschillen tussen branches en tussen bedrijven binnen één branche, maar vaak ook tussen diverse bronnen in één bedrijf. De eisen worden gesteld aan bronnen van uiteenlopende omvang, aan reeds werkende installaties die moeten worden aangepast (*retrofit*) en aan nieuwe installaties.

De betekenis van het begrip 'aanvaardbare' milieukosten is uiteraard rekbaar. Bij de beoordeling van toe te passen milieutechnologie wordt in het milieubeleid van de Europese Unie uitgegaan van het gebruik van de zogenoemde BAT-technologieën (afkorting van de Engelse term *best available technologies*) ofwel van de best beschikbare milieutechnologie. Het uitgangspunt daarbij is dat de strengheid van milieueisen wordt afgestemd op de technieken die ter beschikking staan en uit deze verzameling de technieken die wat betreft de hoeveelheid emissiereductie en de kosten, de beste zijn. De IPPC richtlijn uit 1999 (*Integrated Pollution Prevention and Control*) van de Europese Unie definieert de BAT-technologie als volgt: 'het meest doeltreffende en geavanceerde ontwikkelingsstadium van de activiteiten en exploitatiemethoden, waarbij de

praktische bruikbaarheid van speciale technieken om in beginsel het uitgangspunt voor emissiegrenswaarden te vormen is aangetoond, met het doel emissies en effecten op het milieu in zijn geheel te voorkomen, of wanneer dat niet mogelijk blijkt, algemeen te beperken' [art. 2.11, Bijlage IV IPPC richtlijn, naar De Jonge, 2000]. De overheden moeten dus om BAT te kunnen voorschrijven, informatie hebben over diverse typen milieutechnologie en hun prestaties bij sterk uiteenlopende emissiebronnen. De IPPC richtlijn houdt ook in dat vanaf 2007 alle milieueisen moeten worden gebaseerd op de BAT-technologieën die op dat moment beschikbaar zijn. De selectie van de typen milieutechnologie die als BAT-technologie worden aangemerkt, geschiedt door een panel van deskundigen uit de Europese Unie die in staat worden geacht om alle beschikbare alternatieven te overzien en de emissiereducerende effecten te beoordelen. Daarnaast worden bij de voorbereiding van de richtlijnen belanghebbenden geraadpleegd, waaronder de bedrijven die aan de milieueisen moeten voldoen. De geselecteerde technologieën worden hierna in conceptdocumenten vastgelegd en vervolgens ter toetsing aan afzonderlijke EU-lidstaten voorgelegd (de zogeheten BREF-documenten). Ten slotte worden de getoetste documenten vastgesteld en door het Europese IPPC Bureau uitgebracht. Tot nu toe werden de milieutechnologieën alleen op hun emissiereducerend effect (effectiviteit) beoordeeld. De beoordeling op grond van de emissiereductiekosten wordt vooralsnog lastig bevonden, maar het is wel de bedoeling van de Europese Commissie om bij de selectie van BAT-technologieën rekening te houden met de kosten. Er wordt over gedacht om ook hiervoor gebruik te maken van een panel van deskundigen die in staat worden geacht om de kosten ten gevolge van strengere milieueisen bij diverse bronnen te kunnen schatten [Sørup, 2000].

De vraag is evenwel waar zo'n kostenraming op moet worden gebaseerd want ten tijde van de voorbereiding van de strengere milieueisen is er immers nog weinig bekend over de kosten van de betreffende milieutechnologie. Bovendien moet rekening worden gehouden met honderden soms duizenden individuele emissiebronnen die op grond van kwalitatieve en kwantitatieve kenmerken naar een aantal typen emissiebronnen kunnen worden ingedeeld. Er blijkt dan dat milieuoverheid moet rekening houden met tientallen uiteenlopende typen bronnen die naar branches en grootte worden ingedeeld. De redelijkheid van de kosten zou moeten worden beoordeeld aan de hand van de situatie in één of enkele bedrijven per sector of branche waaruit dan de landelijke of de sectorale gemiddelde kosten moeten worden afgeleid, maar een gemiddeld kostencijfer bevat te weinig informatie om de kosten bij uiteenlopende emissiebronnen te beoordelen. Voor een enigszins adequaat oordeel moet de overheid tenminste inzicht hebben in de toename van de marginale kosten als functie van het emissiereductiepercentage voor een verzameling van emissiebronnen van één type, zoals de toename van de marginale emissiereductiekosten in een branche als gevolg van strengere milieueisen. In hoofdstuk 3 komt de vraag aan de orde of het mogelijk is zo'n emissiereductiekostenfunctie te construeren op basis van de empirische gegevens over één of enkele bedrijven.

In de praktijk zal nog meer informatie nodig zijn dan de door de EU geïnventariseerde BAT-technologieën. Dit komt omdat andere overheden aanvullende milieueisen kunnen stellen. Nadat de milieueisen op basis van BAT door de EU zijn vastgesteld, en vervolgens de EU-richtlijnen zijn vertaald in nationale wetgeving, laat de EU de overheden van haar lidstaten de mogelijkheid om scherpere milieueisen te stellen. De Nederlandse overheid geeft lagere overheden de mogelijkheid om aanvullende eisen te stellen, mits deze worden gemotiveerd. Bij de invoering van de eisen overlegt de betreffende lagere overheid met de individuele bedrijven en branches over een zodanige aanpak dat de kosten beperkt blijven. Individuele bedrijven en soms ook branches kunnen om afwijkingen van de richtlijnen verzoeken, uiteraard met goede redenen omkleed. Verder heeft de overheid de mogelijkheid om bedrijven tijdelijk te ontzien, mits deze hun milieuprestaties daardoor later vergaand verbeteren. Ook de bedrijven die nieuwe, efficiëntere oplossingen willen realiseren kunnen uitstel van de invoering van milieueisen krijgen als ze afspraken over de invoering daarvan maken (de zogenoemde vergunning op basis van preventie of bedrijfsplannen). Door deze aanpassingen bij de invoering van milieueisen stijgt de behoefte aan informatie over de emissiereductiekosten, want de overheid moet kosten bij de diverse bronnen in een branche en soms ook in diverse regio's onderling vergelijken om aanvullende eisen of het uitstel te beargumenteren. Daarnaast hebben ook de bedrijven belang bij betrouwbare ramingen van de emissiereductiekosten voordat de strenge milieueisen worden vastgesteld en ingevoerd. Als bedrijven over de strengheid van de milieueisen en de BAT-technologie willen onderhandelen dan moeten ze hun opvatting onderbouwen met een kostenraming van de beschikbare milieutechnologie die door hen acceptabel wordt geacht. Voor bedrijven is het verkrijgen van informatie over de kosten in zoverre eenvoudiger omdat het type en de omvang van emissie van het bedrijf bij de leiding bekend mogen worden verondersteld. Daarentegen moet de overheid rekening houden met diverse typen bedrijven en mogelijk uiteenlopende typen emissiebronnen per bedrijf, alsmede de vaak wisselende hoeveelheden per bron. De informatieverzameling zal doorgaans meevallen als het gaat om milieuvraagstukken waarmee al veel ervaring is opgedaan, zoals afvalverwerking of stofreductie, maar het wordt lastig als zich nieuwe problemen aandienen waarvoor nog weinig kosteninformatie beschikbaar is, zoals voor emissiereductie van broeikasgassen.

Een praktische vraag is of er een methode valt te ontwikkelen waarmee op grond van een beperkt aantal metingen een redelijk betrouwbare emissiereductiekostenfunctie voor een verzameling van emissiebronnen valt te construeren. Er moet dus worden nagegaan hoe door middel van meting bij slechts enkele bronnen er een voldoende betrouwbare kostenfunctie voor vele bronnen kan worden opgesteld. Een betrouwbare schatting houdt in dat de vooraf geschatte kosten weinig afwijken van de kosten die uiteindelijk gemaakt worden. De specifieke vraag met betrekking tot kostenvoorspellingen die in dit hoofdstuk aan de orde komt is: in hoeverre is het mogelijk om op basis van slechts twee metingen door interpolatie en extrapolatie, een voldoende betrouwbare emissiereductiekostenfunctie voor vele emissiebronnen te construeren?

In paragraaf 3.2 wordt de wijze waarop milieukosten kunnen worden geschat besproken. Hierna wordt in paragraaf 3.3 ingegaan op de wijze waarop de emissiereductiekostenfuncties worden geconstrueerd. De paragraaf 3.4 en 3.5 vormen de kernen van dit hoofdstuk. In paragraaf 3.4 laten wij zien hoe op basis van kostendata bij twee emissiebronnen een volledige emissiereductiekostenfunctie kan worden geschat. Deze methode wordt getoond aan de hand van de emissiereductie van fluoride. De methode wordt vervolgens toegepast in paragraaf 3.5, waarin de kostenfuncties van vele andere emissies op basis van empirische data over slechts twee bronnen worden geschat. Naast het emissiereductiepercentage kan de schaal van de te bestrijden emissies bij de bron van invloed zijn op de emissiereductiekosten. De invloed hiervan komt aan de orde in paragraaf 3.6, waarin tevens nagegaan wordt in hoeverre de overheid per individuele bron een betrouwbare kostenraming aan de hand van enkele bronnen kan maken. Ten slotte worden conclusies getrokken in paragraaf 3.7.

### 3.2 Het belang van milieukostenschattingen

Het belang van een betrouwbare kostenschatting bij de voorbereiding van milieueisen moet worden gezien in het licht van de toegenomen milieukosten in de jaren tachtig en negentig en de nog veel sterker toegenomen kosten verbonden met de voorbereiding en invoering van de milieueisen bij overheid en bedrijven (beheerskosten), waaronder het verzamelen van informatie en onderhandelingen over de wijze waarop aan de gestelde milieueisen kan worden voldaan. De jaarlijkse beheerskosten zijn nu al ruim 15% van de totale milieukosten en ze nemen sterk toe. Vanaf 1980 tot 1996 zijn in Nederland de milieuinvesteringen en de milieukosten in constante prijzen van 1980 respectievelijk 4,5 en 2,7 keer gestegen, terwijl de milieukostendruk bij bedrijven - milieukosten door eigen activiteiten als percentage van de omzet - bijna verdubbeld is. In dezelfde periode zijn de totale beheerskosten in constante prijzen bijna 8 keer gestegen; bij de overheid (beleidskosten) bijna 9 keer en in de nijverheid (milieucoördinatie) bijna 4 keer. De basisgegevens zijn in Bijlage 3.1 te vinden.

Bij ongewijzigde aanpak is het einde van de toename ook niet in zicht. Integendeel, er moet worden verwacht dat in de toekomst de behoefte aan informatie bij de overheid en bedrijven verder toe zal nemen. Dit hangt samen met de vergunningverlening die steeds meer te maken krijgt met vele kleine emissiebronnen, zoals landbouw- en recreatiebedrijven en huishoudens, de zogenoemde diffuse bronnen. Voorts is te verwachten dat de goedkoopste typen milieutechnologie dan inmiddels ingevoerd zijn en duurdere typen milieutechnologie nodig zijn om meer emissiereductie te bereiken, waardoor de afstemming tussen de bronnen en de milieutechnologie om excessieve kosten te voorkomen, nog belangrijker wordt. In samenhang hiermee zal de informatiebehoefte bij overheden en bedrijven over de specifieke kenmerken van bronnen en type milieutechnologie verder toenemen. Daarnaast streeft de overheid er naar om middelvoorschriften door doelvoorschriften te vervangen waardoor bedrijven meer keuzevrijheid krijgen bij het voldoen aan de eisen maar hun

beheerskosten ook zullen toenemen want ze zullen studies naar de geschikte milieutechnologische alternatieven óf zelf moeten doen óf moeten uitbesteden. Daarbij zal de overheid de naleving van doelvoorschriften op basis van emissiemetingen moeten controleren. Dit is doorgaans veel duurder dan het controleren van middelvoorschriften, waar men zich kan beperken tot periodieke bedrijfsbezoeken waarbij nagegaan wordt in hoeverre de voorgeschreven milieutechnologie daadwerkelijk geïnstalleerd is en gebruikt wordt. Derhalve zal men keuze moeten maken bij welke bronnen te meten, waarbij het voor de hand ligt, gezien de risico's van ontduiking, dat de bronnen met zeer hoge kosten vaker moeten worden bemeten dan de bronnen met lage kosten. Gezien de trendmatig toenemende beheerskosten ligt de vraag voor de hand in hoeverre de overheid de milieukosten ten gevolge van in te voeren strengere milieueisen bij de meest uiteenlopende bronnen kan voorspellen zonder dat ze al die bronnen testen van de geschiktheid en haalbaarheid van de milieutechnologieën heeft te doen, zodat ze flink kan besparen op informatieverzameling en op onderhandelingen met bedrijven.

### **Informatieverzameling in het milieubeleid**

Het uitgangspunt van de overheid is dat een milieueis wordt gesteld per type emissiebron op basis van enkele beschikbare typen milieutechnologie. Idealiter zou de overheid per type bron en type milieutechnologie een demonstratieproject bij enkele bronnen moeten uitvoeren om zo de benodigde gegevens voor ieder type bron-milieutechnologie combinatie te verzamelen. Per type bron-milieutechnologie combinatie zouden vervolgens de behaalde emissiereductie en de kosten moeten worden berekend, waarna de emissiereductiekosten voor elke bron worden gespecificeerd. In werkelijkheid ontbreken middelen en tijd om zoveel projecten uit te voeren. Er moeten dus andere methoden worden ontwikkeld om emissiereductiekosten te kunnen voorspellen.

In de praktijk wordt de informatie over emissiereductiekosten verkregen aan de hand van studies en projecten die in opdracht van overheden, door advies- en ingenieursbureaus worden gedaan. De bureaus verwerven de relevante informatie bij de bouw en het gebruik van de installaties bij hun klanten (vaak grote bedrijven). Informatie is ook afkomstig van de leveranciers van milieutechnologie en eigen kostencalculaties. Dankzij deze studies is informatie over één of enkele bedrijfssituaties in detail beschikbaar. Aan de hand van de informatie over de kenmerken van de emissiebronnen bij één of enkele bedrijven van een groep worden de emissiereductiekosten voor de totale groep bedrijven geschat. Daarbij moet noodgedwongen, want bij gebrek aan een andere maatstaf, worden aangenomen dat de kosten bij de bestudeerde bedrijven een goede indicatie van de kosten bij de andere bedrijven geven. Deze werkwijze levert weliswaar de benodigde gegevens op om de totale kosten in een land of een sector te schatten (want door optellingen van de kosten bij vele bronnen worden de hoge en lage kosten uitgemiddeld), maar ze kent belangrijke beperkingen als het gaat om een indicatie van de kosten bij de individuele bedrijven en de daarin aanwezige emissiebronnen.

Allereerst is onbekend in hoeverre de onderzochte bedrijven representatief zijn voor andere bedrijven in een sector of branche. Als het aantal en de diversiteit van bedrijven in een sector groot is (zoals in de grafische industrie of in de chemische industrie), zijn er vele metingen nodig om goede kostenprognoses op te stellen. Daarmee zijn hoge onderzoekskosten gemoeid. Als er daarentegen slechts enkele typen bedrijven zijn (zoals de raffinaderijen en de basismetaal, met slechts enkele grote bedrijven) dan kunnen de kosten op basis van enkele bedrijfssituaties beter worden geschat. Er is dus het risico van ongelijkheid in kwaliteit van informatie. Er kan relatief veel en betrouwbare informatie zijn over enkele grote bronnen en over de branches met weinig typen bedrijven en, daartegenover, weinig data en onvoldoende betrouwbare informatie over de kleine bronnen en branches met vele typen bedrijven. In aanvulling daarop moet de verzamelde informatie periodiek worden aangepast aan de veranderingen in de bedrijfsvoering, waarbij het qua kosten veel uit kan maken of de eisen aan een bestaande of aan een nieuwe installatie worden gesteld. Daarnaast is onzeker in hoeverre de emissiereductiekosten per bron wel zo betrouwbaar zijn geraamd. Enige twijfel over de betrouwbaarheid van data is gerechtvaardigd wanneer de informatie over het gebruik van een milieutechnologie van de emitterende bedrijven zelf moet worden verkregen. Die hebben doorgaans geen belang bij de strenge milieueisen en zijn derhalve geneigd om de kosten te overschatten, waarmee ze uitstel hopen te verkrijgen. Bovendien is de afstemming tussen de bronnen en de milieutechnologie meestal niet perfect. De toepassing van een milieutechnologie kan bij bepaalde typen bronnen knelpunten opleveren door specifieke product- en proceskenmerken. Voorts is milieutechnologie niet perfect deelbaar waardoor ze niet precies op de schaal van de processen en producten kan worden afgestemd, temeer omdat de productiecapaciteit in de tijd kan veranderen. Dit kan leiden tot verschillen in kosten tussen bedrijven die hetzelfde type milieutechnologie toepassen. Er zou dus veel specifieke informatie nodig zijn om een goede afstemming tussen een bron en een milieutechnologie te bereiken want iedere bron-milieutechnologie combinatie kent een unieke emissiereductie en daarmee verbonden kosten. Dit staat op gespannen voet met de behoefte om op de kosten van informatieverzameling te besparen door te kijken naar enkele bron-milieutechnologie combinaties die als standaard voor vele andere situaties worden geacht.

Aldus rijst bij de voorbereiding van de milieueisen en de onderhandeling over vergunningverlening bij de bronnen de vraag: wat zijn de emissiereductiekosten, gegeven een X aantal type emissiebronnen, een Y aantal typen milieutechnologie en een Z hoeveelheid emissie in de verzameling van bronnen. Bij het beantwoorden van deze vraag dienen de schaarse onderzoeksmiddelen effectief te worden ingezet, terwijl excessieve emissiereductiekosten moeten worden vermeden. Het is dus relevant om na te gaan wat de aanknopingspunten in de literatuur zijn die men zou kunnen gebruiken bij het ontwikkelen van een schattingsmethode.

## Neoklassieke theorie

Het ligt voor de hand om eerst te rade te gaan bij de economische theorie en dan met name bij de neoklassieke theorie. In de neoklassieke theorie wordt de kostenfunctie afgeleid uit de als een extern gegeven veronderstelde productiefunctie bij gegeven prijzen van de inputs (kapitaal, arbeid, grondstoffen, en dergelijke). Voor elk haalbaar niveau van output wordt gezocht naar de combinatie van de input waarbij de kosten minimaal zijn. Verondersteld wordt dat de productiefunctie *well behaved* is. Deze veronderstelling impliceert dat de inputs volledig deelbaar zijn (op de lange termijn) en dat hun marginale productiviteit afneemt bij toenemende inzet. Bij kostenminimalisatie geeft dit een continue marginale kostenfunctie als functie van de output. Het verloop van de marginale kostenfunctie (afnemend, constant of toenemend) hangt af van de eigenschappen van die productiefunctie.

Naar analogie hiervan kan emissiereductie worden gezien als een output. De productiefunctie zou dan de technisch mogelijke emissiereducties en de daarvoor benodigde inputs moeten specificeren. Aldus wordt de emissiereductiekostenfunctie bepaald door voor elk haalbaar emissiereductie-niveau de inputcombinatie met minimale kosten te bepalen. Daarbij wordt aangenomen dat de kosten met één type emissie samenhangen, bijvoorbeeld met de emissiereductie van biologisch afbreekbare stoffen, ofschoon er in de praktijk ook positieve en negatieve neveneffecten op andere emissies zijn (zo zuivert een biologische waterzuiveringsinstallatie, naast de biologisch afbreekbare stoffen, ook diverse zware metalen die niet afbreekbaar zijn en, omgekeerd, ze veroorzaakt zelf ook emissies, zoals stank).

Als er wordt uitgegaan van een gegeven capaciteit van het bedrijf en daarmee een gegeven niveau van onbestreden emissie bij volledige capaciteitsbenutting, dan geldt de schaal van de onbestreden emissie als een vaste ondeelbare factor. Bij de gegeven schaal zullen bij toenemende emissiereductiepercentages ten opzichte van de initiële onbestreden emissie, de marginale en de gemiddelde emissiereductiekosten toenemen, om in de buurt van 100% emissiereductie de technische bestrijdingslimiet te bereiken. Bij volledige deelbaarheid van de productiemiddelen heeft de schaal van de onbestreden emissie geen invloed op de gemiddelde en marginale emissiereductiekosten, dat wil zeggen: de gemiddelde kosten van 70% emissiereductie van één ton onbestreden emissie zijn even hoog als 70% emissiereductie van 100 ton onbestreden emissie. Als er zich wel ondeelbaarheden voordoen, bijvoorbeeld door een minimaal vereiste omvang van de beschikbare zuiveringsapparatuur, kunnen de gemiddelde emissiereductiekosten dalen als functie van de schaal van de onbestreden emissie.

De neoklassieke aanpak is theoretisch elegant, maar hierin wordt verondersteld dat informatie beschikbaar is over alle emissiebronnen en over alle oplossingen voor emissiereductie. Aangezien de benodigde informatie bij de voorbereiding van milieueisen niet beschikbaar is, staat deze aanpak staat ver af van de praktijk in het milieubeheer. Deze benadering is dus niet bruikbaar om de emissiereductiekosten te voorspellen.



## Cost engineering

Een andere aanpak om de productiefunctie te bepalen is na te gaan welke variabelen op de productie van invloed zijn om vervolgens per variabele de kosten te ramen. Daarmee kan een kostenfunctie worden geconstrueerd. Hierbij wordt aangenomen dat de kenmerken van productietechnologie in sterke mate de kostenfunctie bepalen [Lassman, 1958; Gold, 1975]. De productietechnologie legt dus de kostenfuncties binnen nauwe grenzen vast; zo zou de metaalbewerking vrijwel onafhankelijk van inputprijzen een andere kostenfunctie hebben dan de chemische bewerking. Naar analogie hiervan zouden de kenmerken van processen en producten in sterke mate de emissiereductiekostenfunctie bepalen; zo zal de emissiereductiekostenfunctie in de basismetaal anders zijn dan die in de chemie. Op grond van deze *cost engineering* benadering zouden de bron-milieutechnologie combinaties met uiteenlopende technologische kenmerken - heterogene verzamelingen - sowieso zeer verschillende emissiereductiekostenfuncties kennen, terwijl de combinaties met vergelijkbare technologische kenmerken - homogene verzamelingen - ook gelijke kostenfuncties hebben. De kostenfuncties van homogene verzamelingen, zoals één type milieutechnologie in een branche met vergelijkbare processen, zouden dus wel kunnen worden voorspeld; bijvoorbeeld lage NO<sub>x</sub>-branders in gasgestookte elektriciteitscentrales. Op grond van deze benadering is getracht om homogene verzamelingen van industriële emissiebronnen te definiëren. Hierbij zijn per branche, technologisch vergelijkbare deelprocessen afgebakend (bijvoorbeeld opslag, overslag of distillatie) die emissiebronnen vormen waarop één en hetzelfde type milieutechnologie moet worden toegepast [Quakernaat en Don, 1988]. Ook bij het opstellen van de milieueisen voor diverse sectoren op grond van BAT-technologie, dat in paragraaf 3.1 is toegelicht, worden *cost engineering* emissiereductiekostenfuncties geconstrueerd. In de volgende paragraaf zullen wij ingaan op het construeren van een dergelijke kostenfunctie. De gedachtegang die in de *cost engineering* benadering is ontwikkeld, vormt tevens de basis voor het milieubeleid gericht op de stimulering van de meest efficiënte productieprocessen en het ontmoedigen van de inefficiënte processen, de *benchmarking*. Daarbij wordt namelijk verondersteld dat men de efficiëntie van uiteenlopende productieprocessen goed kan voorspellen.

De betekenis van de technologische kenmerken voor het specificeren van de productiefunctie wordt door vele auteurs die met *cost engineering* bezig zijn onderkend, maar er zijn ook nuanceringen aangebracht. Diverse auteurs stellen dat de kosten ook sterk worden beïnvloed door de wijze waarop de productie is georganiseerd. Bij de organisatie van de productie spelen vele factoren een rol als capaciteitsbenutting, wisselingen in de productie, kwaliteit van het personeel, leerprocessen in het gebruik van technologie en de kwaliteit van de producten. Wij gaan hier niet verder op in; elders is dat uitvoerig beschreven [Rosegger, 1980; Porter, 1996]. Naar analogie hiervan zouden de emissiebronnen met vergelijkbare technologische kenmerken in werkelijkheid toch heterogeen zijn, waardoor de kosten van het bestrijden van dezelfde eenheid emissie, bijvoorbeeld een kg SO<sub>2</sub> bij een gelijk emissiereductiepercentage, toch uiteenlopen. Daarbij

kunnen vele factoren de emissiereductiekosten beïnvloeden, onder andere: type verontreiniging in de grondstof (bijvoorbeeld zwavel in brandstof), de samenstelling van het product (zoals het zwavelgehalte in het product), de verkoopmogelijkheden van bijproducten (zoals verkoop van zwavelzuur door winning van zwavel uit hoogzwavelige producten), omschakeling in de productie waardoor de capaciteit van de zuiveringstechnologie wordt onderbenut (bijvoorbeeld die van de gaswassers), de omvang van de afvoerstroom die door de condities bij verbranding in de vuurhaard worden bepaald en de concentratie van stoffen daarin (want verdunde en wisselende emissies zijn te duur om te behandelen), alsmede de samenstelling van de afvoerstroom (want stoffenmengsels zijn vaak ook duurder te behandelen dan zuivere stromen).

Om de emissiereductiekosten te ramen en daarbij rekening te houden met al deze factoren, zijn cost engineering simulatiemodellen gemaakt. De simulatiemodellen worden ontwikkeld per groep van bedrijven met vergelijkbare proceskenmerken waarbij de belangrijkste variabelen, zoals ingaande en uitgaande stromen en uiteenlopende typen technologie, zodanig worden nagebootst dat de gevolgen van milieueisen op emissie en bedrijfsvoering kunnen worden gemeten. Hiermee worden scenario's gemaakt van de gevolgen van milieueisen op kosten bij diverse typen bedrijven en milieutechnologie [Ros en Van der Plaat, 1986; Kuil en Krozer, 1996]. Een beperking van de simulatiemodellen is dat het duur is om ze te ontwikkelen, te verifiëren en te onderhouden, waardoor overheden bij uitzondering bereid zijn om voldoende onderzoeksmiddelen daarvoor te geven. Daarnaast zijn bedrijven vaak terughoudend met het leveren van bedrijfsinformatie met het argument dat deze vertrouwelijk is. Ook zijn bedrijven sceptisch over de mogelijkheden om sterk uiteenlopende situaties na te bootsen, uit vrees dat kwalitatief onvoldoende berekeningen tot onredelijke eisen zullen leiden of dat vanwege de uitkomsten strenge milieueisen zullen worden opgesteld. Uit de cost engineering studies komt naar voren dat de emissiereductiekosten als gevolg van milieueisen door zoveel factoren worden beïnvloed dat ze moeilijk te voorspellen zijn, tenzij er bronnen worden geanalyseerd met goed vergelijkbare grondstoffen, procestechnologie, organisatie van productie en vergelijkbare producten. Daarbij moet de analyse telkens voor één type milieutechnologie worden gedaan. De kostenvoorspelling van strenge milieueisen zou duur zijn indien bij het voorbereiden van milieueisen de milieubeleidsmakers met alle factoren rekening moeten houden.

In deze studie is een andere invalshoek gekozen voor het schatten van de kostenfunctie dan het achterhalen van alle belangrijke factoren die de kostenfunctie kunnen beïnvloeden, omdat de gegevens over de bronnen nu eenmaal zeer onvolledig zijn. Op grond van waarnemingen van kosten bij vele bronnen wordt aangenomen dat de marginale kosten exponentieel toenemen als functie van het emissiereductiepercentage, maar de steilheid van de toename noch de schaal van de emissiereductie zijn bekend. Op grond van deze empirische bevinding wordt de emissiereductiekostenfunctie in twee stappen geschat om de onbekenden te ondervangen. Eerst wordt de kostentoeename geschat onafhankelijk van de schaal van emissiereductie, waarmee alleen

het verloop van een kostencurve kan worden aangegeven. Wij gebruiken daarbij de functie  $cr_{i+1} = cr_i * e^{kcr}$  (e is natuurlijk logaritme), waarbij de marginale kosten van de bron - milieutechnologie combinatie i +1 uit de kosten van de i combinatie worden afgeleid. De exponent kcr geeft wel de steilheid van de kostencurve weer, maar er kan nog geen verband met emissiereductie worden gelegd. Om de steilheid van de kostencurve te voorspellen zijn nodig: de kostenexponent kcr, een bron-milieutechnologie combinatie  $cr_i$  die het uitgangspunt is voor de berekening van de volgende combinatie en het aantal combinaties n in de verzameling. In deze aanpak kunnen de combinaties achter elkaar worden berekend, want de exponent geeft de posities van de volgende combinatie op de kostencurve aan. Hiermee wordt aangegeven hoe sterk de marginale kosten oplopen naarmate een hoger emissiereductiepercentage wordt geëist zonder dat uitsluitel wordt gegeven over de kosten bij individuele bronnen.

Daarna wordt het verband tussen de kostencurve en de schaal van emissiereductie gelegd. Dit geschiedt aan de hand van schaaufactoren voor milieutechnologie per type emissiebron. Om de emissiereductiekostenfunctie te schatten is het in aanvulling op de kostencurve, nodig om de schaal van de emissiereductie te kennen die bij de corresponderende combinaties wordt bereikt. Hiervoor moet bekend zijn wat het verband is tussen de toename van de emissiereductiekosten en het emissiereductiepercentage (op de ordinale as van de emissiereductiekostenfunctie). Dit verband is op voorhand niet aan te geven, maar het kan empirisch worden geraamd.

In de volgende paragrafen wordt nagegaan, hoe de emissiereductiekostenfunctie op basis van empirische data wordt geconstrueerd (gegeven de capaciteit en de schaal van onbestreden emissie), hierna in hoeverre de kostencurve inderdaad kan worden voorspeld met de exponent, en ten slotte of er schaaufactoren voor milieutechnologie kunnen worden aangereikt waarmee realistische emissiereductiekostenfuncties voor de gehele verzameling worden geschat.

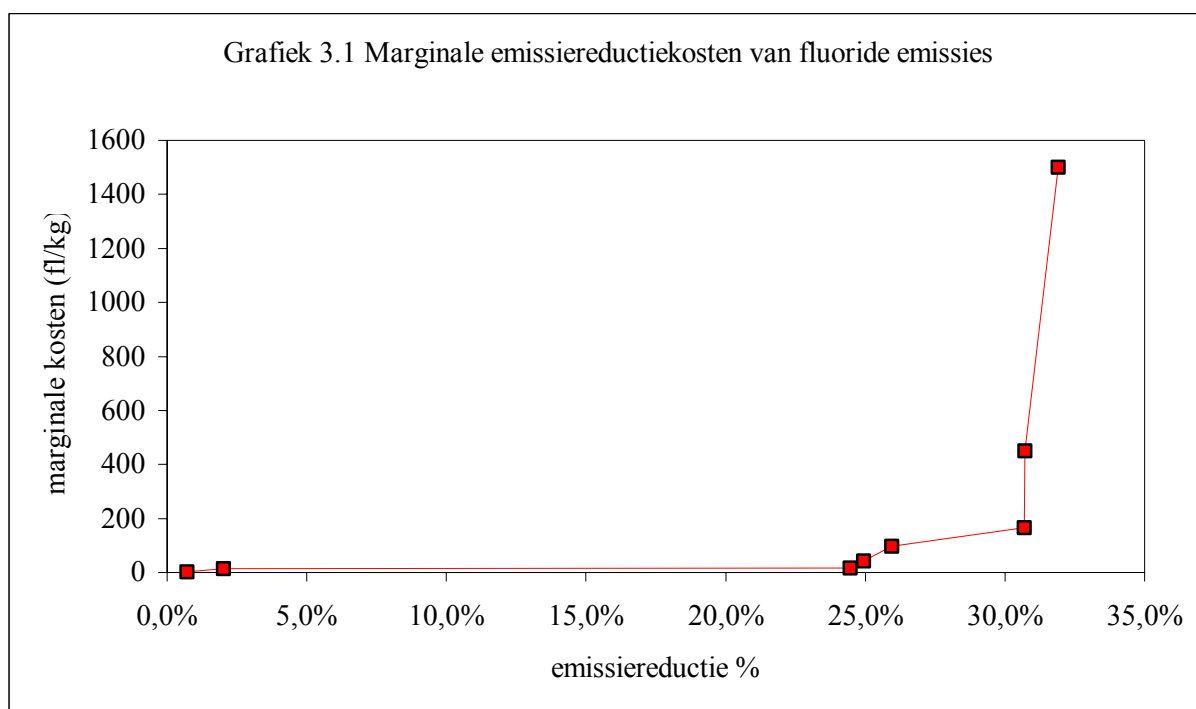
### 3.3 Een empirische emissiereductiekostenfunctie

In deze paragraaf wordt aan de hand van een voorbeeld aangegeven hoe een empirische emissiereductiekostenfunctie wordt geconstrueerd. Het voorbeeld betreft de kostenfunctie van de bestrijding van fluoride emissies naar lucht in de Nederlandse economie, waarbij een aantal bronnen en typen milieutechnologie worden onderscheiden. Er wordt uitgegaan van een gegeven schaal van onbestreden emissie. De aandacht richt zich op de relatie tussen het emissiereductiepercentage en de marginale kosten.

In Grafiek 3.1 staat de kostenfunctie grafisch weergegeven. Langs de verticale as staan de marginale emissiereductiekosten in guldens per kilogram emissiereductie van fluoride naar lucht. Horizontaal staat de emissiereductie als percentage van de onbestreden fluoride emissie. Het maximaal haalbare emissiereductiepercentage is afgerond 32%. Bij sommige emissiebronnen kan meer reductie dan bij andere bronnen worden bereikt. Voor de gehele verzameling van bron-milieutechnologie combinaties geldt dat meer emissiereductie technisch niet haalbaar is of dat er

onvoldoende data zijn. De kostenfunctie is getrapt, met een beperkte toename van de marginale emissiereductiekosten bij een laag emissiereductiepercentage (tot rond 25% emissiereductie) en sterk toenemende kosten bij hogere emissiereductiepercentages. Deze emissiereductiekostenfunctie is illustratief voor de andere kostenfuncties die in paragraaf 3.5 worden besproken, ofschoon de meeste andere emissies veel verder kunnen worden gereduceerd, waarbij emissiereductiepercentages voor de verzameling van bron-milieutechnologie combinaties van 80% tot zelfs 95% niet ongebruikelijk zijn.

De grafiek is geconstrueerd aan de hand van acht bron-milieutechnologie combinaties die milieutechnisch geschikt worden geacht om aan de milieueisen te voldoen. De gegevens over de betreffende combinaties staan vermeld in Tabel 3.1 die laat zien op basis van welke gegevens de marginale kostenfunctie in de grafiek is berekend. De gegevens zijn afkomstig van secundaire bronnen [Sloof, 1989] en hebben betrekking op de jaren 1984 en 1985. In de tabel worden de gegevens per kolom toegelicht.



Tabel 3.1 Voorbeeld van dataset voor een verzameling van bron-milieutechnologie combinaties voor de emissiereductie van fluoride naar lucht (naar Sloof, et al., 1989)

	Kolom 2	Kolom 3	Kolom 4	Kolom 5	Kolom 6	Kolom 7	Kolom 8	Kolom 9	Kolom 10	Kolom 11
Nr	Sector	Emissie-bronnen	Onbestreden emissie (kg/jaar) $e_i$	Technologie	Emissie-reductie kg/jaar er	Rest-emissie kg/jaar e-er	Reductie-percent. per bron (%), R	Reductie als % van totale emissie bij alle grote bronnen R	Kosten fl./jaar Cr	Marginale kosten fl./kg cr
1	Glas-industrie	Recyclen van glazen flessen	56000	Meer oud glas recyclen en kalumiet	18000	38000	32,1	0,07	54000	3
2	Fijn-keramische industrie	Rookgas	35000	Reiniging droog en CaO	33000	2000	94,3	2,0	500000	15
3	Grof-keramische industrie	Rookgas	600000	Reiniging droog en CaO	570000	30000	95,0	24,4	10000000	18
4	Aluminium industrie	Anode bereiding	298000	Adsorptie en filter	12000	286000	4,0	24,9	500000	42
5	Glasvezel-industrie	Rookgas	30000	Alkaline rookgas reiniging	26000	4000	86,0	26,0	2500000	96
6	Aluminium industrie	Verdamping in hallen	286000	Rookgasreiniging door wassing	120000	166000	42,0	30,7	20000000	167
7	Fosfaat-productie	Fosforzuur proces	20000	P-zuur divers	1000	19000	5,0	30,7	450000	450
8	IJzer en staal	Sintering	39000	Elektronfilter SO <sub>2</sub> wassen	30000	9000	76,9	31,9	45000000	1500
	Nederland	Gebruikte data	1364000		810000	554000	Niet relevant	59% t.o.v. emissie van onderhavige data	79004000	98 gewogen gemiddelde
		Alle grote bronnen	2539000							

#### Kolom 1: bron-milieu technologie combinatie

In kolom 1 zijn de acht bron-milieu technologie combinaties ( $n = 8$ ) geordend in volgorde van de toenemende marginale emissiereductiekosten die in kolom 11 zijn weergegeven. Het toenemende verloop van de marginale kostenfunctie is dus het resultaat van het uitgangspunt dat eerst de bron-milieu technologie combinaties worden toegepast met de laagste kosten per bestreden kg fluoride emissie en pas daarna en aanvullend de duurdere oplossingen.

#### Kolom 2: sectoren

De data hebben betrekking op de grote emissiebronnen van fluoride. De bronnen zijn naar sectoren ingedeeld, waarbij er per sector meerdere emissiebronnen zijn. Het is verondersteld dat de sectorale indeling de individuele emissiebronnen goed typeert. Het gaat om de volgende sectoren (type emissiebronnen): glas, fijnkeramische industrie, grofkeramische industrie, glasvezel, aluminium industrie, fosfaat, ijzer en staal.

#### Kolom 3: emissiebronnen

In de aluminium industrie worden twee typen emissiebronnen onderscheiden: emissie bij de productiestap waarin de anode wordt bereid (nr. 4) en emissie wanneer het aluminium wordt gemaakt, namelijk door verdamping in de hallen (nr. 6). In de overige sectoren is er slechts één type bron van fluoride emissie namelijk het fluor in het rookgas. In deze verzameling leidt de opsplitsing van zeven sectoren in emissiebronnen tot acht emissiebronnen.

#### Kolom 4: onbestreden emissie

In deze verzameling wordt alleen fluoride emissie naar lucht in beschouwing genomen. De totale onbestreden emissie van fluor naar lucht van alle grote bronnen is circa 2.539 ton per jaar; de emissie van kleine bronnen is gering. De optelsom van onbestreden emissies van de hier onderscheiden emissiebronnen bedraagt 1.364 ton per jaar. Dit is circa 54% van de onbestreden fluor emissie van de grote bronnen tezamen. De onbestreden emissie van fluoride naar lucht verschilt sterk per bron, variërend van 20.000 kg per jaar tot circa 600.000 kg per jaar. Daarnaast zijn er nog emissies van fluor naar water, bodem en vast afval. De totale fluoride emissie naar alle milieu - compartimenten was medio jaren tachtig circa 73.778 ton per jaar, waarvan veruit de meeste emissie naar afvalwater (ruim 58%). Voorts is er een grote hoeveelheid fluorhoudend afval. De onbestreden emissie van een bron wordt in het vervolg aangeduid met  $e_i$ .

#### Kolom 5: milieu technologie

Om de fluoride emissies te reduceren wordt milieu technologie toegepast. In deze verzameling zijn zes typen milieu technologie te vinden: 1. hergebruik glas, 2. droogstelsel met CaO, 3. Adsorptie bij bewerking aluinaarde, 4. gasreiniging, 5. schoon fosforzuur proces, 6. elektrofilter. Deze typen

milieutechnologie zijn gebaseerd op de beoordeling van deskundigen medio jaren tachtig over de mogelijkheden om fluor emissies te reduceren. Het gaat hierbij om de potentiële toepassingen van de genoemde typen milieutechnologie bij de emissiebronnen, want ten tijde van de beoordeling werden deze nog niet op grote schaal toegepast. Het is mij onbekend in hoeverre deze technologieën intussen wel zijn toegepast. De meeste typen milieutechnologie die in de tabel zijn opgenomen, hebben het karakter van toegevoegde zuiveringstechnologie, bijvoorbeeld rookgasreiniging (milieutechnologie nummer 6). Daarnaast zijn er enkele typen procesgeïntegreerde technologie te vinden, zoals bij de fosforzuurproductie (nummer 7) en de productgeïntegreerde technologie bij glasrecycling (nummer 1). Enkele typen milieutechnologie kunnen bij verschillende emissiebronnen worden toegepast. In de tabel staat de milieutechnologie ‘reiniging droog en CaO’ (fluoride emissiereductie door toevoeging van droge kalk). Deze milieutechnologie kan worden toegepast in de fijn- en de grofkeramische industrie (nummers 2 en 3 in de tabel).

#### Kolom 6 tot en met 9: schaal van emissiereductie en het emissiereductiepercentage

De emissiereductie,  $er_i$ , wordt bereikt door een milieutechnologie toe te passen bij een emissiebron of bij een groep van gelijksoortige emissiebronnen. De gegevens betreffen de jaarlijkse emissiereductie. Bijvoorbeeld bron-milieutechnologie combinatie 1 wordt gevormd door de emissiebron van fluoride bij flessenproductie met de milieutechnologie glasrecycling. Het zuiveringseffect hiervan is 18.000 kg per jaar, oftewel 32,1% ten opzichte van de onbestreden emissie in die emissiebron,  $e_i$ . Er worden drie begrippen gehanteerd: (1) de omvang van onbestreden emissie  $e_i$  bij bron  $i$ , (2) emissiereductie,  $er_i$ , is de schaal van emissiereductie van bron-milieutechnologie combinatie  $i$ , (3)  $r_i$  is het emissiereductie percentage bij bron  $i$ . Aldus is  $e_i$  de onbestreden emissie bij de bron 1,  $er_i$  is de emissiereductie bij die bron en  $r_i$  is het emissiereductie percentage ( $er_i/e_i$ ) \* 100.

De totale of cumulatieve emissiereductie,  $Er_i$ , is de optelsom van de emissiereducties van de bron-milieutechnologie combinaties in de verzameling, bijvoorbeeld de totale emissiereductie van de eerste en de tweede combinatie is 18.000 kg + 33.000 kg = 51.000 kg. De totale emissiereductie van de fluoride emissie naar lucht in deze verzameling is 810.000 kg. Het emissiereductiepercentage,  $R$ , is de cumulatieve (totale) emissiereductie ( $Er$ ) uitgedrukt als percentage van de onbestreden emissie ( $E$ ), in dit geval is de totale onbestreden emissie van fluoride naar lucht afkomstig van alle grote bronnen in Nederland. De totale onbestreden emissie is gelijk aan 2.539.000 kg. Het emissiereductiepercentage door de eerste combinatie is gelijk aan  $18.000/2.539.000 = 0,07\%$ . Door alle emissiereducerende milieutechnologieën in Tabel 3.1 toe te passen kan maximaal 32,1% worden gereduceerd ten opzichte van de totale onbestreden fluoride emissie naar lucht afkomstig van de grote bronnen in Nederland.

#### Kolom 10 en 11: Totale emissiereductiekosten per bron-milieutechnologie combinatie

Het toepassen van een milieutechnologie vereist investeringen en het gebruik gaat gepaard met jaarlijkse kosten. De investeringen omvatten bouwkundige voorzieningen, zoals het aanpassen van

hallen of schoorstenen of het plaatsen van elektromechanische apparaten zoals voor het reinigen van fluoride emissie. Daarnaast zijn er operationele kosten zoals die van arbeid, energie, en dergelijke. De investeringskosten zijn niet apart in de tabel weergegeven, maar ze zijn in de berekeningen van de kosten uiteraard wel meegenomen.

De totale jaarlijkse emissiereductiekosten bij een bron, Cr, is de som van de kapitaallasten wegens afschrijvingen en interest van investeringen, en de operationele kosten, na aftrek van alle kostenbesparingen en opbrengsten (bijvoorbeeld door lager energieverbruik of verkoop van bijproducten). De jaarlijkse kosten van de bron-milieutechnologie combinaties variëren van 54.000 gulden per jaar (combinatie nummer 1) tot 20 miljoen gulden per jaar (combinatie nummer 6). De schattingen van de benodigde investeringen en de jaarlijkse kosten van een milieutechnologie zijn meestal gebaseerd op studies van emissiebronnen door advies- en ingenieursbureaus. Deze studies zijn vaak in opdracht van de overheid gedaan om de emissiereductiekosten ten gevolge van beoogde strengere milieueisen te bepalen. Eerst worden de benodigde investeringen geraamd aan de hand van de bouwplannen voor installaties en de kostenindicaties die de leveranciers van milieutechnologie aanleveren. Op basis daarvan worden de jaarlijkse kapitaallasten van bouwwerken en installaties berekend, waarbij rekening wordt gehouden met de afschrijvingstermijn (in jaren) en met de rente op het geïnvesteerd vermogen. Voor overheidsinvesteringen is een reële rente van circa 4% tot 5 % gangbaar. Bedrijven hanteren vaak een hogere rente, bijvoorbeeld van 10%, omdat ze een hogere rentabiliteit beogen. Verder worden de jaarlijkse variabele kosten geschat. Het gaat daarbij om het personeel dat de installaties moet bedienen, onderhoud van de installaties, en daarnaast elektriciteit- en brandstofverbruik, kosten van hulpstoffen, en dergelijke. Soms levert een milieutechnologie een kostenbesparing op. De schattingen van de investeringen en de jaarlijkse emissiereductiekosten zijn meestal gebaseerd op de kosten van één bedrijf of enkele bedrijven die qua proceskenmerken en omvang op elkaar lijken.

In het voorbeeld van fluoride emissiereductie is de raming van de kosten van rookgasreiniging gebaseerd op de situatie in enkele bedrijven. Rookgasreiniging kan namelijk worden toegepast in de fabriek voor glasvezel (in Nederland staat één zo'n fabriek) tegen jaarlijkse kosten van 2,5 miljoen gulden (combinatie nummer 5) en tevens in de aluminiumindustrie (in Nederland staan twee aluminiumfabrieken) tegen jaarlijkse kosten van circa 20 miljoen gulden (combinatie nummer 6). De raming van de jaarlijkse kosten van de rookgasreiniging in de glasvezel fabriek is gebaseerd op één emissiebron. De kostenraming van rookgasreiniging in de aluminiumfabrieken is het gewogen gemiddelde van twee bronnen. Soms moeten veronderstellingen over vele verschillende bronnen worden gemaakt om de totale emissiereductiekosten te ramen. De emissiereductiekosten bij extra glasrecycling (combinatie 1) betreft de kosten minus de opbrengst van glasrecycling. De kosten zijn de som van afdank van oud glas (gemiddeld per huishouden maal het aantal huishoudens met een mix van middelen), inzameling (gemiddeld per gemeente), transport naar een recyclingbedrijf (per gemeente gemiddelde transportkosten) en recycling (gemiddeld per bedrijf). De opbrengst door



verkoop van oud glas omvat de gewogen gemiddelde prijzen per glastype (wit, groen en bruin) maal de ingezamelde hoeveelheid per type glas. Het saldo van kosten en opbrengst is op 54.000 gulden geschat, rekening houdend met de mix van ingezameld oud glas. De betrouwbaarheid van de kostenschattingen kan in de meeste gevallen niet worden geverifieerd doordat er geen statistische of ervaringsdata beschikbaar zijn.

#### Kolom 11: marginale emissiereductiekosten ( $c_r$ )

De marginale emissiereductiekosten,  $c_r$ , zijn berekend per bron-milieutechnologie combinatie. De marginale emissiereductiekosten zijn de totale jaarlijkse kosten gedeeld door de totale jaarlijkse emissiereductie van een emissiebron-milieutechnologie combinatie:  $c_{r_i} = C_{r_i} / e_{r_i}$ . De totale kosten gedeeld door de totale emissiereductie binnen een sector geeft de marginale emissiereductiekosten van een sector die de gemiddelde kosten per eenheid emissiereductie over een aantal bronnen zijn. Door stapeling van de marginale emissiereductiekosten in diverse sectoren wordt de marginale emissiereductiekostenfunctie verkregen. Zo zijn in het voorbeeld van de fluoride emissiereductie de marginale emissiereductiekosten een stapeling van de kosten en de emissiereductie bij glaszameling, de grof- en fijnkeramische industrie, enzovoorts. Er wordt gesproken over de marginale emissiereductiekosten bij een bron-milieutechnologie combinatie.

Bij het opstellen van een emissiereductiekostenfunctie worden milieutechnologieën geordend naar de toenemende kosten per eenheid emissiereductie bij de bron; eerst de milieutechnologie met de laagste marginale kosten, vervolgens de op één na goedkoopste mogelijkheid, enzovoorts. Zo zijn in Tabel 3.1 de acht bron-milieutechnologie combinaties geplaatst in oplopende volgorde van de marginale kosten. De laagste marginale emissiereductiekosten heeft de bron-milieutechnologie combinatie nr. 1 (flessenproductie in glassector):  $c_{r(1)} = 54.000/18.000 = 3$  gulden per kg emissiereductie. De hoogste marginale emissiereductiekosten heeft de bron-milieutechnologie combinatie nr 8. (elektrofilter en  $SO_2$  - wasser bij ijzer- en staalproductie):  $c_{r(8)} = 45.000.000/30.000 = 1.500$  gulden per kg emissiereductie. In werkelijkheid kan de opsplitsing van emissiereductie en kosten per bron lastig zijn, bijvoorbeeld omdat het rookgas weliswaar door één schoorsteen gaat, maar het rookgas van meerdere bedrijven en branders binnen één bedrijf afkomstig is, zoals in de fijn- en grofkeramische industrie. Als milieutechnologie voor rookgasreiniging wordt geïnstalleerd dan moeten de emissiereductie en de emissiereductiekosten op de één of andere manier aan de betrokken emissiebronnen worden doorberekend. In deze data is de totale emissie van de branche opgenomen, die van meerdere bronnen afkomstig is. De marginale emissiereductiekostenfunctie wordt opgebouwd door de optelling van emissiereducties aan de hand van de stapeling van de opeenvolgende bron-milieutechnologie combinaties; in het voorbeeld van fluoride door de emissiereductiepercentages van de combinaties 1 tot en met 8.

Duidelijkheidshalve vatten wij de te gebruiken symbolen nog eens samen:

$n$ , het aantal emissiebron-milieutechnologie combinaties;

$E$ , de totale jaarlijkse onbestreden emissie van de verzameling van bron-milieutechnologie combinaties (meestal in kilogram, kg);  $e_i$ , de jaarlijkse onbestreden emissie van één bron;

$$E = \sum_{i=1}^n e_i$$

$E_r$ , de totale jaarlijkse emissiereductie in de verzameling (in kilogram, kg);  $e_r$  emissiereductie van één bron;

$$E_r = \sum_{i=1}^n e_{r_i}$$

- $R$ , het percentage (%) emissiereductie ten opzichte van de onbestreden emissie, oftewel het emissiereductiepercentage;  $r_i$ , het emissiereductiepercentage bij één bron,  $R = 100 * E_r / E$
- $Cr$  (in gulden) staat voor de totale jaarlijkse kosten van emissiereductie van één bron;  $c_r$  voor de marginale emissiereductiekosten, oftewel kosten per additionele eenheid emissiereductie van één bron (gulden per kg emissiereductie).

Deze terminologie en symbolen worden toegelicht aan de hand van het voorbeeld van de bron-milieutechnologie combinaties nummers 1 en 2:

- $n = 2$ ;
- De totale onbestreden emissie is  $E = 56.000 \text{ kg} + 35.000 \text{ kg} = 91.000 \text{ kg}$ ;
- De cumulatieve emissiereductie is  $E_r = (18.000 \text{ kg} + 33.000 \text{ kg}) = 51.000 \text{ kg}$ ;
- Het emissiereductie percentage is  $R = 51.000 \text{ kg} / 91.000 \text{ kg} * 100\% = 56\%$ ;
- De totale emissiereductiekosten zijn  $Cr_1 = 54.000 \text{ gulden per jaar}$ ,  $Cr_2 = 500.000 \text{ gulden per jaar}$ ;
- De marginale emissiereductiekosten zijn  $c_{r1} = 54.000 \text{ gulden per jaar} / 18.000 \text{ kg} = 3 \text{ gulden per kg emissiereductie}$ ,  $c_{r2} = 500.000 \text{ gulden per jaar} / 35.000 \text{ kg} = 14.285 \text{ gulden per kg}$ .

### 3.4 Schatting van een emissiereductiekostenfunctie.

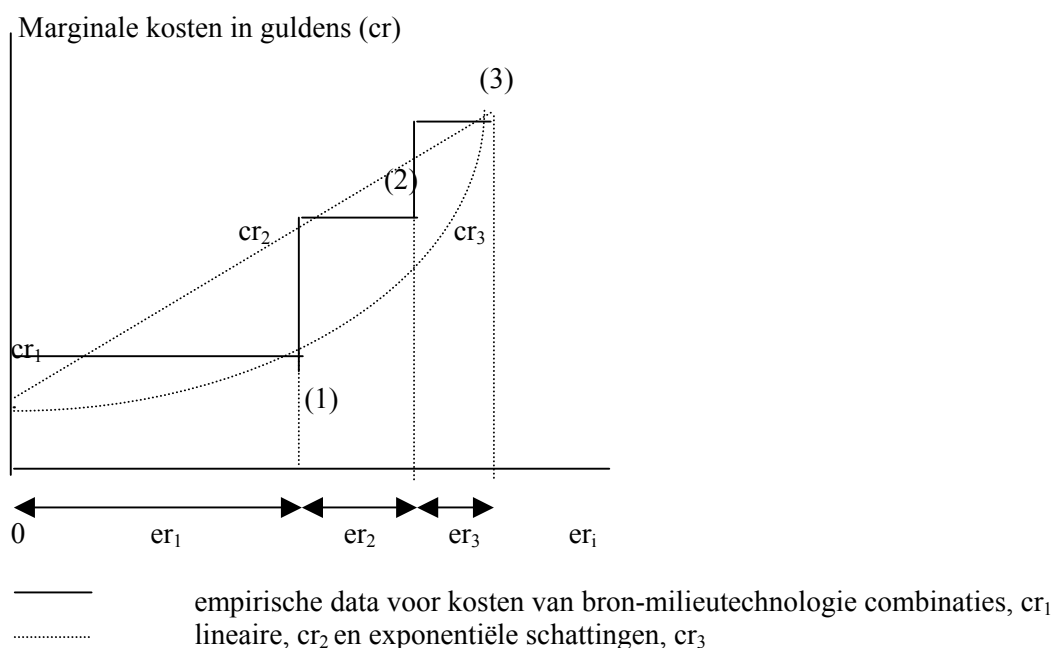
In de vorige paragraaf is aangegeven hoe een emissiereductiekostenfunctie kan worden opgesteld als er voldoende gegevens beschikbaar zijn. In het voorbeeld van fluoride emissiereductie naar lucht was er informatie over de omvang van de emissiebronnen en de emissiereductie per bron, alsmede over de kosten verbonden met emissiereductie voor acht bron-milieutechnologie combinaties.

Stel nu dat er minder informatie beschikbaar is. Laat het op grond van de landelijke inventarisatie van de belangrijke emissiebronnen en typen milieutechnologie bekend zijn dat er acht bron-milieutechnologie combinaties kunnen worden toegepast. Tevens is er informatie over het emissiereducerend effect van de betreffende combinaties. Wat ontbreekt is betrouwbare kennis van de kosten van elke combinatie. Er is tijd en geld om als demonstratieproject slechts twee verschillende

bron-milieutechnologie combinaties toe te passen om inzicht te krijgen in de bestrijdingskosten behorende bij die combinaties. Aldus verkrijgt men de informatie over de kosten van twee bron-milieutechnologie combinaties in één verzameling. De vraag is of het dan toch mogelijk is een complete kostenfunctie te construeren die de verwachte kosten van een gegeven emissiereductiepercentage voldoende betrouwbaar voorspelt. Deze vraag zal hier worden beantwoord. Het is een empirische vraag die alleen langs proefondervindelijke weg kan worden beantwoord. Het betoog valt uiteen in twee delen. Eerst wordt onderzocht welke functie op basis van kostenschattingen het beste past bij de functie op basis van de empirische data waarin afzonderlijke bron-milieutechnologie combinaties staan weergegeven. Vervolgens wordt geanalyseerd of een kostenfunctie berekend op basis van de kostengegevens over slechts twee combinaties redelijk overeenkomt met de empirische kostenfunctie of daarvan sterk afwijkt.

In Figuur 3.1 is de situatie geschetst waarin empirische data over drie bron-milieutechnologie beschikbaar zijn. De emissiereductiekostenfunctie op basis van de drie empirische data wordt weergegeven door de getrapte lijn. Verder zijn twee mogelijke geïdealiseerde benaderingen van de empirische functies afgebeeld: de één lineair, de andere exponentieel. Op de X-as staat het emissiereductiepercentage ten opzichte van de onbestreden emissie van die bronnen. Op de Y-as staan de marginale emissiereductiekosten. De punten (1), (2), en (3) corresponderen met de empirische waarneming van de emissiereductiekosten als de bronnen de milieutechnologie in aanvulling op elkaar toepassen. De waargenomen marginale kosten  $cr_1$ ,  $cr_2$  en  $cr_3$  corresponderen met de emissiereducties  $er_1$ ,  $er_2$  en  $er_3$  die gerealiseerd worden door cumulatie van de technologieën  $n_1$ ,  $n_2$  en  $n_3$ .

Figuur 3.1 Emissiereductiekostenfunctie op basis van waarnemingen en schattingen



In deze en de volgende paragrafen zal de bruikbaarheid worden geanalyseerd van een marginale emissiereductiekostenfunctie van de volgende exponentiële vorm, met natuurlijk logaritme,  $e$ , als grondslag:  $cr_{i+1} = cr_i * e^{kcr}$ ;  $e^{kcr} > 1$

Hierin zijn dus  $cr_i$ , respectievelijk  $cr_{i+1}$  de emissiereductiekosten van bron-milieutechnologie combinatie  $i$  respectievelijk  $i+1$ . De grondslag van natuurlijk logaritme, het getal  $e$ , geeft de waarde 2,71828. De  $kcr$  is een exponent waarvan de waarde nader te bepalen valt. Een bijzondere eigenschap van deze functionele vorm is dat de marginale kosten van opeenvolgende combinaties te bepalen zijn zonder gebruik te maken van gegevens over de schaal van de bereikte emissiereductie. De marginale kosten van een volgende combinatie zijn een constante factor ( $e^{kcr}$ ) duurder dan de marginale kosten van de voorafgaande combinatie.

De gehanteerde formule impliceert:  $cr_{i+2} = cr_{i+1} * e^{kcr} = cr_i * e^{kcr} * e^{kcr} = cr_i * e^{2kcr}$

Voor de combinatie nummer  $(i+m)$  geldt dus:  $cr_{i+m} = cr_i * e^{mkcr}$

Als een dergelijke relatie bestaat en de kosten  $cr_i$  en  $cr_{i+m}$  bekend zijn, kan de kostenexponent  $kcr$  als volgt worden berekend:

$$cr_{i+m} / cr_i = e^{mkcr}$$

$$= \ln (cr_{i+m} / cr_i) = mkcr$$

$$= kcr = [\ln (cr_{i+m} / cr_i)]/m$$

Stel dat van een verzameling van  $n$  bron-milieutechnologie combinaties alleen de marginale kosten van de combinatie met de laagste marginale kosten ( $cr_1$ ) en de hoogste marginale kosten ( $cr_n$ ) bekend zijn. De kostenexponent kan dan als volgt worden berekend:  $kcr = [\ln (cr_n / cr_1)] / (n - 1)$

De vraag is nu of de bovenstaande ‘geïdealiseerde marginale kostenfunctie een adequate beschrijving geeft van de werkelijkheid en geschikt is voor het doen van kostenvoorspellingen. Daartoe wordt berekend in hoeverre deze geconstrueerde exponentiële kostenfunctie de empirisch waargenomen kostenfunctie goed beschrijft.

### Schatting bij volledige informatie

Als voorbeeld worden hier de data over de fluoride emissiereductie uit Tabel 3.1 gebruikt. Eerst wordt de exponentiële kostenfunctie berekend op basis van de empirische marginale kosten van alle acht bron-milieutechnologie combinaties. Zie voor deze berekeningen Tabel 3.2. Vervolgens laat Tabel 3.3 zien hoe de exponentiële kostenfuncties worden geschat met behulp van slechts twee kostengegevens. In Tabel 3.2 staan de empirische data in kolom 2 weergegeven. Op basis daarvan is in kolom 3 de verhouding tussen de marginale kosten berekend met de formule  $cr_{i+1} / cr_i$ . Vervolgens is in kolom 4 van elke cijfer uit kolom 3 de natuurlijke logaritme berekend. De gehanteerde formule is  $\ln (cr_{i+1} / cr_i)$ , op grond van de algemene formule  $kcr = [\ln (cr_{i+m} / cr_i)]/m$ , met  $m = 1$ . De getallen in kolom 4 zijn dus de waargenomen waarde van  $kcr$ . De waarde van  $kcr$  wordt uit acht waarnemingen berekend met behulp van de methode van kleinste kwadraten. Deze minimaliseert de afstand tussen de waargenomen waarden en de geschatte waarden. De aldus berekende waarde op basis van alle gegevens is  $kcr_0 =$

0,89. Met behulp van  $kcr_0 = 0,89$  en gebruikmakend van de empirische waarneming  $cr_1 = 3$  kan nu de geschatte marginale kostenfunctie worden opgesteld met de formule:  $cr_{i+1} = cr_i * e^{0,89}$ ,  $i = 1, \dots, 8$ . Dit zijn de getallen in kolom 5 van Tabel 3.2. Kolom 6 geeft het verhoudingsgetal: berekende marginale kosten (kolom 5) gedeeld door empirische marginale kosten (kolom 2). Per combinatie bezien, komen forse uitschieters voor: naar beneden (voor  $n=2$ ) en naar boven ( $n=6$ ). Toch is de correlatiecoëfficiënt  $R$  van de cijferreeksen uit kolom 2 (empirische data) en kolom 5 (geschatte kosten) hoog  $R = 0,99$ .

Tabel 3.2 Marginale emissiereductiekosten voor fluoride emissiereductie, empirisch en berekend					
1	2	3	4	5	6
Empirische data uit Tabel 3.1		Berekening van de kostenexponent		Berekende kostenfunctie	
$n_i$	$cr_i$	$cr_{i+1} / cr_i$	$\ln(cr_{i+1}/cr_i)$	$cr_{i+1} = cr_i * e^{kcr}$	$A_i = \text{geschat/empirisch}$
1	3	-	-	3	1
2	15	5,05	1,62	8	0,53
3	18	1,16	0,15	19	1,05
4	42	2,38	0,86	45	1,07
5	96	2,31	0,84	110	1,15
6	167	1,73	0,55	266	1,59
7	450	2,70	0,99	647	1,44
8	1.500	3,33	1,20	1.572	1,05
		Kostenexponent $kcr_0 = 0,89$			

### Schatting bij onvolledige informatie

De vraag is nu of bij het ontbreken van volledige informatie over de emissiereductie en kosten bij bron-milieutechnologie combinaties, toch een schatting van de kostenfunctie kan worden gemaakt die de empirische kostenfunctie getrouw weergeeft. In deze subparagraaf worden de berekeningen aan de hand van het fluoride voorbeeld toegelicht. Hierbij zal een situatie worden behandeld waarbij metingen van emissiereductie en kosten bij slechts twee bronnen zijn gedaan en de rest van de data moet worden geschat. Uitgaande van twee bron-milieutechnologie combinaties in een verzameling wordt de exponent van de kostenfunctie  $kcr$  berekend. De kostenexponenten zijn berekend aan de hand van twee willekeurige bronnen en aan de hand van de bron met de laagste en de bron met de hoogste marginale kosten. Op basis van de exponent worden de marginale kosten bij de ontbrekende combinaties geëxtrapoleerd. Ten slotte worden de empirisch waargenomen schaal van emissiereductie bij de corresponderende combinaties en de geschatte marginale emissiereductiekosten met elkaar vermenigvuldigd om de totale kosten te ramen.

Stel dat twee willekeurige empirische data over bron-milieutechnologie combinaties en hun marginale kosten bekend zijn. Hiermee kan de kostenexponent worden berekend waarna alle andere kostendata worden geëxtrapoleerd. De exponent  $kcr_1$  is berekend aan de hand van de marginale kosten van twee willekeurige bronnen die zijn geselecteerd met de *ad random generator*. In het fluoridevoorbeeld in Tabel 3.1, gaat het om de combinaties 3 en 4:  $cr_4 = 42$ ,  $cr_3 = 18$  (afgerond van Milieu en Innovatie

17,5). De berekening is:  $kcr_1 = \ln (cr_4 / cr_3) / (4-3)$ . In dit voorbeeld is  $kcr_1 = \ln (42/18) / (4-3) = 0,86$ . Op basis van de exponent  $kcr_1$  worden de andere data berekend met de formule:  $cr_{i+1} = cr_i * e^{kcr_1}$ , waarbij de waargenomen waarde  $cr_3 = 18$  als startpunt wordt genomen. Dit is:  $cr_4 = cr_3 * e^{0,86} = 18 * 2,718^{0,86} = 42$ . Vervolgens kan  $cr_5$  worden berekend op basis van  $cr_4$ , enzovoorts. Voor de emissiebronnen met lagere marginale emissiereductiekosten dan  $cr_i$ , in het fluoride voorbeeld zijn dit  $cr_2$  en  $cr_1$ , is de berekening  $cr_2 = cr_3 * e^{-0,86} = 18 / 2,718^{0,86} = 7$ . Het zal duidelijk zijn dat deze berekening alleen kan worden uitgevoerd als er informatie is over het aantal mogelijke bron-milieutechnologie combinaties en bovendien bekend is waar de twee combinaties, waarvan de kosten bekend zijn, geplaatst moeten worden indien de combinaties op kostenvolgorde worden gezet. Voor dit laatste is precieze kennis van de kosten per combinatie niet nodig, maar wel moet bekend zijn of combinatie A hogere of lagere emissiereductiekosten heeft dan de combinatie B.

Een alternatief is dat de data voor de combinaties met de laagste en de hoogste marginale kosten en het totaal aantal combinaties bekend zijn. Hiermee wordt de kostenexponent berekend waarna de kosten van alle andere combinaties worden geëxtrapoleerd, uitgaande van de laagste kostencombinatie. De exponent  $kcr_2$  is als volgt berekend:  $kcr_2 = \ln (cr_n / cr_1) / (n-1)$ . In het voorbeeld van fluoride emissiereductie is  $n = 8$ ,  $cr_1 = 3$ ,  $cr_8 = 1.500$ , dit is  $kcr_2 = \ln (1.500/3) / 7 = 0,89$ . Op basis van  $kcr_2$  worden de marginale kosten van de tussenliggende combinaties geschat op basis van de formule  $cr_{(i+1)} = cr_{(i)} * e^{kcr_2}$ . Bijvoorbeeld voor  $cr_2$  is de raming:  $cr_2 = cr_1 * e^{0,89} = 3 * e^{0,89} = 7,5$ . De resultaten van de berekeningen van de kostenfunctie voor fluoride emissiereductie in het geval alle data bekend zijn en in het geval er data over twee combinaties bekend zijn, staan in Tabel 3.3. De waarden van de exponenten  $kcr$  in de drie schattingen verschillen weinig van elkaar maar in de combinaties 6 en 7 zijn er wel forse verschillen tussen de geschatte en de empirisch waargenomen marginale kosten.

Tabel 3.3 Geraamde marginale kosten in guldens aan de hand van drie alternatieve exponenten				
Bron milieu-technologie combinaties	Empirische marginale kosten	Raming als alle data bekend zijn	Raming als twee willekeurige data bekend zijn; $i = 3$ en $i = 4$	Raming als de bron met de hoogste en de laagste kosten bekend is
n	cr	cr, $kcr_0 = 0,89$	cr, $kcr_1 = 0,86$	cr, $kcr_2 = 0,89$
1	3	3	3	3
2	15	8	7	7
3	18	19	18	18
4	42	45	42	43
5	96	110	99	105
6	167	266	235	254
7	450	647	588	617
8	1.500	1.572	1.326	1.500

Hiermee kunnen de totale kosten worden geraamd mits bekend zijn: de emissiereductie van iedere combinatie en de plaats van de combinatie op de kostenfunctie. De totale kosten worden berekend door de geschatte marginale kosten van elke combinatie te vermenigvuldigen met de waargenomen emissiereductie die met die combinatie wordt bereikt. Ter illustratie, de totale kosten op grond van de waarnemingen van de vijfde combinatie zijn:  $Cr_{(5)} = cr_{(5)} * er_{(5)} = 96 * 26\ 000 = 2.500.000$  gulden. De totale kosten aan de hand van de kostenschatting met  $kcr_1$  zijn:  $Cr_{(5)} = cr_{(5)} * er_{(5)} = 99 * 26\ 000 = 2.572.783$  gulden. De berekende totale kosten met de exponenten staan in Tabel 3.4 (kleine afwijkingen komen door afrondingen).

### Nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van schattingen

Nagegaan is in hoeverre schattingen van de marginale emissiereductiekosten ten opzichte van de empirische data voldoende nauwkeurig en betrouwbaar zijn; dit staat onderaan in Tabel 3.4 aangegeven.

De nauwkeurigheid van de schattingen is groter naarmate de afwijkingen tussen de geschatte en de waargenomen marginale emissiereductiekosten kleiner zijn. De nauwkeurigheid van de kostenfunctie is getoetst aan de hand van de correlatiecoëfficiënt  $R$ . Deze is berekend door de waarde van de berekende marginale kosten te weten  $cr_a$ ,  $cr_b$  respectievelijk  $cr_c$  te correleren met de empirische waarden  $cr$  vermeld in kolom 3. Wij beschouwen een coëfficiënt van 0,9 en hoger als een voldoende nauwkeurige weergave van de empirische emissiereductiekostenfunctie. Uit Tabel 3.4 blijkt dat alle schattingen van de marginale kosten voor fluoride emissiereductie dichtbij de empirische data liggen. Op grond van de correlatieberekening blijkt dat de schattingen inderdaad nauwkeurig zijn; de correlatie is circa 0,99.

Voorts is bepaald of de geschatte totale kosten niet te veel afwijken van de waargenomen totale kosten in de verzameling. Een beperkte afwijking betekent dat de schatting betrouwbaar is. De betrouwbaarheid wordt berekend door de geschatte totale kosten te delen door de waargenomen totale kosten en dit quotiënt te vermenigvuldigen met 100. Dit wordt gedaan per bron-milieu technologie combinatie en vervolgens voor de gehele verzameling. De berekening van de betrouwbaarheid van de gehele verzameling is:

$$C = 100 * \frac{\sum_{i=1}^n Cr_s}{\sum_{i=1}^n Cr_w}$$

Daarin zijn  $Cr_s$  de kostenschattingen en  $Cr_w$  de waargenomen totale kosten. De schatting wordt betrouwbaar geacht als de geschatte kosten minder dan 30% van de empirische data naar boven of naar beneden afwijken. De betrouwbaarheidsindex zou dus binnen de ondergrens 70 en bovengrens 130 moeten liggen. De over- en onderschatting van kleiner dan 30% is een arbitrair criterium, maar een dergelijke afwijking mag acceptabel worden geacht gezien de onzekerheden over de toekomstige emissiereductiekosten bij de voorbereiding van de milieueisen. In alle drie varianten zitten drie

onbetrouwbare schattingen uit een totaal van acht combinaties; één onderschatting (nr. 2) en twee overschattingen (nr. 6 en 7 met uitzondering van  $kcr_1$ ). De over- en onderschattingen compenseren elkaar waardoor de schattingen van de totale kosten voor de gehele verzameling betrouwbaar zijn.

Tabel 3.4 Empirische data en schattingen van de emissiereductiekosten van fluoride; emissiereductie in kg, kosten in guldens												
n	Empirische data			Alle data zijn bekend			Twee willekeurige data zijn bekend (hier 3 <sup>e</sup> en 4 <sup>e</sup> combinatie)			Bekend zijn bronnen met de hoogste en laagste marginale kosten		
	Emissie-reductie Er	Totale kosten Cr	cr	cr <sub>0</sub>	Cr <sub>0</sub> = Er*cr <sub>0</sub>	Cr <sub>0</sub> /Cr	cr <sub>1</sub>	Cr <sub>1</sub> = Er*cr <sub>1</sub>	Cr <sub>1</sub> /Cr	cr <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> = Er*cr <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> /Cr
1	18000	54000	3	3	54000	100	3	55988	104	3	54000	100
2	33000	500000	15	8	250885	50	7	243775	49	7	240542	48
3	570000	10000000	18	18	10529106	105	18	10000000	100	18	10095020	101
4	12000	500000	42	45	538584	108	42	499987	100	43	516380	103
5	26000	2500000	96	109	2835313	113	99	2572783	103	105	2718421	109
6	12000	20000000	167	265	31795415	159	235	28200922	141	254	30484578	152
7	1000	450000	450	644	643782	143	558	558129	124	617	617241	137
8	30000	45000000	1500	1564	46926220	104	1326	39765635	88	1500	44991582	100
Tot.	810000	79004000			93573305	118		818972191	104		89717763	114
Correlatiecoëfficiënt				kcr <sub>0</sub> = 0,89, R <sub>0</sub> = 0,993 C <sub>0</sub> = 118			kcr <sub>1</sub> = 0,86 R <sub>1</sub> = 0,991 C <sub>1</sub> = 104			kcr <sub>2</sub> = 0,89 R <sub>2</sub> = 0,993 C <sub>2</sub> = 114		

### 3.5 Schattingen van emissiereductiekosten

De nauwkeurigheid en voldoende betrouwbaarheid van de kostenschattingen van fluoride emissiereductie kunnen op toeval berusten. In deze paragraaf worden kostenschattingen voor andere verzamelingen van bron-milieutechnologie combinaties gedaan om te bepalen in hoeverre de schattingen met behulp van de gehanteerde exponenten nauwkeurige en betrouwbare resultaten opleveren. Eerst worden de gebruikte data beschreven en vervolgens worden de kostenschattingen gepresenteerd en beoordeeld op nauwkeurigheid en betrouwbaarheid.

#### Databestanden

Het soort kostenschatting dat voor de fluoride emissiereductie werd gepresenteerd, is uitgevoerd voor 28 uiteenlopende verzamelingen van bron-milieutechnologie combinaties met één type emissie per verzameling. De meeste verzamelingen betreffen emissies naar lucht. Er zijn slechts enkele



verzamelingen met data over emissies naar water. Het bepalen van de emissiereductiekosten per stof naar water is lastig omdat vele emissies gelijktijdig in waterzuiveringsinstallaties worden opgevangen. Daarbij is het onderscheid per stof alleen op basis van een toerekening mogelijk, doch de toerekeningsregels zijn arbitrair.

In de analyse worden empirische data met betrekking tot bron-milieutechnologie combinaties, die daarmee bereikte emissiereductie en de kosten daarvan gebruikt. Daarbij komen uiteenlopende typen milieutechnologie voor: zowel de toegevoegde zuiveringstechnologie (zoals rookgasreiniging), als de procesgeïntegreerde milieutechnologie (bijvoorbeeld energiebesparingstechnologie) en de productgeïntegreerde milieutechnologie (zoals wateroplosbare verf). Technologie gericht op andere terreinen dan milieubeheer, maar met positieve neveneffecten op de emissiereductie zijn niet meegenomen; dus niet 'lichtere auto's' wel 'zuinige auto's'. Het gaat om typen milieutechnologie die al eerder zijn gedemonstreerd en derhalve als een al beschikbare milieutechnologie kunnen worden aangemerkt. De data zijn grotendeels gecompileerd in diverse onderzoeken door H. Heijnes, J. Jantzen, C. Sadee en de auteur van dit proefschrift bij werkzaamheden van het Instituut voor Toegepaste Milieu-economie (TME). De auteur is erkentelijk voor de medewerking en de mogelijkheid deze data te gebruiken. De basisgegevens zijn bij de auteur in te zien, ze zijn deels anoniem om redenen van vertrouwelijkheid van bedrijfsgegevens. Gebruikt zijn alleen de data die per saldo kosten met zich meebrengen. De data die kostenneutraal zijn of per saldo baten opleveren (negatieve kosten) blijven buiten beschouwing. De data over de bron-milieutechnologie combinaties moeten ook voldoende gespecificeerd zijn geweest. Een minimale dataspecificatie omvat:

- aard van de emissie (soort vervuilende stof);
- sector of bron(nen) van de emissie;
- specificatie van de milieutechnologie;
- de onbestreden (initiële) emissie van de bron;
- emissiereductie door de technologie toegepast bij de bron;
- jaarlijkse emissiereductiekosten door toepassing van milieutechnologie.

Aan de hand van deze basisdata worden de (gemiddelde) marginale emissiereductiekosten, cr, dat wil zeggen kosten per eenheid emissiereductie van de bron-milieutechnologie combinaties, berekend op de manier zoals aangegeven bij het fluoride voorbeeld. De data hebben betrekking op twee aggregatieniveaus. Er is gebruik gemaakt van data die op sectorniveau zijn gespecificeerd (zoals voor fluoride emissie) en daarnaast van bedrijfsinterne data. De gegevens over de combinaties betreffen dus de emissiereductie en de kosten daarvan in een branche, of ze betreffen data over één individueel bedrijf waarin meerdere emissiebronnen voorkomen waarbij de data per bron zijn gespecificeerd. De sectorale data zijn afkomstig van documenten en databases voor kostenramingen op nationaal niveau. In deze data wordt een gehele sector of branche als één bron beschouwd, zoals de chemische industrie of de aluminiumproductie. In werkelijkheid bestaat een sector vaak uit meerdere bronnen die

qua kenmerken en omvang van emissie onderling verschillen, maar bij de analyse op sectorniveau wordt daaraan voorbij gegaan. Er wordt aangenomen dat een milieutechnologie bij alle bronnen binnen de betreffende sector wordt toegepast. De sectorale data zijn ontleend aan meerdere databestanden. Het tijdstip voor het verzamelen van data voor de publicatie staat tussen haakjes maar onbekend is veelal in welke periode de basisdata hiervoor zijn gemeten. De meeste data zijn medio jaren negentig van de vorige eeuw gepubliceerd, de oorspronkelijke kostendata zijn eind jaren tachtig verzameld en berekend. De volgende databestanden zijn gebruikt:

- *Basis- en Criteriadocumenten* van het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne (RIVM) voor benzeen (1981), cadmium (1985), fenol (1981), fluoride (1985), (fijne) stof (1981), koper (1985), polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's) (1985), propyleenoxide (1982), styreen (1981), toluen (1982) en zink (1990) [Apeldoorn, 1986; Koten-Vermeulen et al., 1986; Meulen, 1987; Slooff, 1987; Slooff et al., 1987; Slooff en Blokzijl, 1987; Ros en Slooff, 1988; Slooff et al., 1989; Cleven et al., 1993].
- Het databestand van het *Model on Sustainable Environmental Strategies* (Moses) van het Instituut voor Toegepaste Milieu-economie (TME): voor NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, Vluchtige Organische Stoffen (VOS), ammonia (NH<sub>3</sub>), zware metalen en fosfaten (de meeste data zijn afkomstig uit de periode na 1985) [Jantzen, 1992].
- Het databestand van het Icarus-model (1985) voor energiebesparing, met CO<sub>2</sub>-data van het bureau Ecofys [Blok, 1990].

De bestanden omvatten verschillende typen emissies naar lucht en water. Naar lucht gaat het om de verbrandingsemissies (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> en SO<sub>2</sub>), procesemissies voor drie emissiegroepen (VOS, stof en zware metalen), procesemissies van organische stoffen (benzeen, fenol, styreen en toluen), procesemissies van anorganische stoffen (NH<sub>3</sub> en fluoride), specifieke (giftige) stoffen die meestal in kleine hoeveelheden vrijkomen (propyleenoxide, PAK's). Naar water gaat het om emissies van zware metalen, waarvan drie afzonderlijk genoemd (cadmium, koper en zink) en emissies van anorganische stoffen (fosfaat). Deze databestanden omvatten de gemiddelde van de marginale emissiereductiekosten van verschillende bronnen binnen één sector, waarbij geen data over de afzonderlijke emissiebronnen binnen de sector beschikbaar zijn. De sectorale data zijn doorgaans kostenschattingen aan de hand van een beperkt aantal bedrijfssituaties.

De bedrijfsdata betreffen de gegevens over emissiereductie en kosten die per emissiebron in een bedrijf zijn gespecificeerd, zoals reductie van SO<sub>2</sub>-emissie bij een verbrandingsinstallatie in een bedrijf. Meestal gaat het om één type milieutechnologie per emissie en in één bedrijf. In sommige bedrijven zijn er meerdere emissiebronnen en meerdere milieutechnologieën die in aanvulling op elkaar worden toegepast om het zuiveringseffect te verhogen. De bedrijfsdata zijn dus veel specifieker dan de sectorale data, omdat hierbij de kosten en de emissies van afzonderlijke emissiebronnen zijn gegeven. De bedrijfsdata zijn afkomstig van twee onderzoeken. Een dataset is gebaseerd op het onderzoek naar de efficiëntie van verhandelbare emissierechten voor SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub>. Het onderzoek is

uitgevoerd in 1996 en geeft de situatie in 1995 weer. Het gaat om ramingen van deskundigen bij een ingenieursbureau op basis van bedrijfsdata's. De bedrijfsdata zijn afkomstig van deskundigen in individuele bedrijven in de chemische industrie, elektriciteitsbedrijven, basismetaal en raffinaderijen. Bij emissiereductie wordt vaak toegevoegde zuiveringstechnologie gebruikt, zoals loogwassers voor SO<sub>2</sub> en selectieve katalytische reductie voor NO<sub>x</sub> [Heijnes et al., 1997]. Een andere dataset is gebaseerd op het onderzoeken in het kader van het Convenant KWS 2000, waarbij de data door de ingenieurs van TNO op basis van bedrijfsdata zijn opgesteld. Het omvat data over emissiereductie en emissiereductiekosten voor gechloreerde koolwaterstoffen in de elektrotechnische en de metaalindustrie. In deze dataset zijn voornamelijk de procesgeïntegreerde oplossingen opgenomen, zoals vervanging van gechloreerde koolwaterstoffen door andere middelen [Heslinga, 1995]. De bedrijfsdata zijn anoniem gemaakt.

De juistheid van de kosten en emissiedata wordt beperkt doordat ze niet altijd meetresultaten van feitelijk gemaakte milieukosten in praktijksituaties zijn. De gegevens zijn gebaseerd op studies van emissiebronnen, zoals wanneer een nieuwe milieutechnologie gedemonstreerd wordt, en van schattingen door deskundigen. De sectorale data zijn afkomstig van diverse studies naar de toepassing van milieutechnologie in bedrijven. Deze data zijn vervolgens gebruikt in de eerder genoemde criteria- en basisdocumenten en in de twee genoemde modellen Icarus en Moses. De kwaliteit van de data in de studies varieert omdat ze van verschillende en qua methode zeer uiteenlopende studies afkomstig zijn. Bovendien is onbekend op welke wijze de data voor die studies verzameld zijn. Het is dus niet mogelijk om vast te stellen welke data afkomstig zijn van metingen in meerdere bedrijven, welke data gebaseerd zijn op enkele metingen of ramingen van technici in bedrijven en welke data schattingen van onderzoekers betreffen. Ook de periode van dataverzameling varieert, zodat de productiecapaciteit en de samenstelling van de producten variëren. De meeste data in de genoemde modellen dateren van medio jaren tachtig, maar sommige data van de basis- en criteriadocumenten zijn ouder en stammen uit begin jaren tachtig. De data zijn dus imperfect.

De bovengenoemde modellen en RIVM- documenten zijn niettemin door specialisten van overheden en bedrijven gecontroleerd. Tot op heden zijn dat de best beschikbare gegevens over de marginale emissiereductiekosten in Nederland (de data in de modellen worden periodiek aangepast). De data van de modellen worden eveneens gebruikt door de EU om emissiereductiekosten te schatten en door de Wereldbank om schattingen van milieukosten in diverse landen te ondersteunen. Derhalve kunnen ze worden beschouwd als *best estimate*. De juistheid van de bedrijfsdata is hoger dan die van de sectorale data omdat in het eerste geval de kosten en de emissiereductie in de specifieke bedrijfssituaties en per bron zijn geraamd, terwijl in het tweede geval de data veelal op slechts enkele bedrijven in een sector zijn gebaseerd. Maar ook hier is onbekend in hoeverre de data schattingen van deskundige of metingen zijn. Er zijn geen gegevens beschikbaar over de processpecificatie van bedrijven zoals de productieomvang en het type producten. Voorts kan één installatie de emissie van

meerdere bronnen reduceren waardoor de kosten van een installatie aan meerdere afzonderlijke bronnen worden doorberekend.

### **Kerngegevens over de verzamelingen**

In Tabel 3.6 zijn per type emissie de belangrijkste data samengevat die van belang zijn voor de verdere analyse is dit hoofdstuk. Een volledige dataset per stof is vergelijkbaar aan de hiervoor beschreven data van de fluoride emissie. In kolom 1 staan typen emissie. Het gaat om 28 verzamelingen per type emissie naar lucht uit landbouw, industrie, diensten en huishoudens, waarvan 19 bestaan uit sectorale data en 9 uit bedrijfsdata. In de kolommen 2 en 3 staat het aantal bron-milieutechnologie combinaties: eerst het aantal combinaties in de ongeschoonde verzameling en in kolom 3 het aantal data in de geschoonde verzameling: dat wil zeggen exclusief enkele uitschieters. In de kolommen 4 en 5 staan de kleinst en de grootst haalbare emissiereductie per bron-milieutechnologie combinatie. De kolommen 6 en 7 vermelden de emissiereductiepercentages die worden bereikt indien een minimum en maximum aan milieutechnologie wordt gebruikt. In de kolommen 8 en 9 staan de laagste en de hoogste marginale emissiereductiekosten.

Tabel 3.5 Samenvatting van de basisdata van emissiereductie en emissiereductiekosten n = alle data; n' = exclusief enkele uitschieters; kosten in guldens per kg emissiereductie								
Verzamelingen bron –milieutechnologie combinaties	n	n'	Schaal van emissiereductie per bron–milieutechnologie combinatie in kg		Emissiereductie in percentage van onbestreden emissie		Marginale emissiereductiekosten	
			Minimaal	Maximaal	Minimaal	Maximaal	Minimaal	Maximaal
<b>Sectorale data</b>								
Benzeen	13		3000	144000	55%	66%	1,9	2143
Cadmium	4		40	400	30%	66%	325,0	125000
CO <sub>2</sub>	82	79	4724496	1264917176	47%	59%	0,0007	3
Koper	4		3300	27200	4%	35%	165,4	2734
Fijne stof	13		42000	3114000	2%	72%	1,1	20
Fluoride	8		1000	570000	1%	32%	3,0	1500
Fosfaat	10		200000	32160000	38%	97%	4,2	148
Metalen lucht	13		2400	1138000	0%	98%	178,3	2600
Metalen water	16	14	750	570000	34%	72%	23,7	1333
NH <sub>3</sub>	12	10	500000	30095167	13%	62%	3,8	31
NOx	102	99	23333	125970000	15%	77%	0,1	51
PAK's	6		1000	256000	40%	85%	182,8	1785
Fenol	7		2000	12000	13%	39%	2,0	115
Propyleen	7		8600	21500	20%	73%	1,9	58
SO <sub>2</sub>	36	35	60000	613850000	0%	87%	0,5	8
Styreen	15		6000	567000	13%	79%	2,1	76
Tolueen	20		2000	796860	3%	41%	0,1	1000
VOS	47		200000	18000000	38%	73%	0,7	16
Zink	6		650	17100	27%	80%	99,4	7341
<b>Bedrijfsdata</b>								
Cl-metaal	23		25	26000	50%	100%	3,8	1424
NOx chemie	256	253	12	4368320	1%	90%	0,01	2181
NOx elektriciteit	100	97	20292	7030171	0%	93%	0,3	214
NOx metaal	73	70	3	1373445	0%	77%	0,2	34957
NOx raffinaderij	41	39	90	4211100	1%	89%	0,9	1905
SO <sub>2</sub> chemie	56	53	150	4099000	13%	95%	1,3	4700
SO <sub>2</sub> elektriciteit	19	17	568958	28224342	12%	96%	0,8	11
SO <sub>2</sub> metaal	44	43	881	4199630	17%	83%	2,6	407
SO <sub>2</sub> raffinaderij	18	17	39600	18726300	8%	85%	2,6	66

De basisgegevens laten zien dat er een grote spreiding bestaat in het aantal bron-milieutechnologie combinaties per verzameling. Bijvoorbeeld: voor de NOx-emissiereductie in de bedrijfsdata is het kleinste aantal combinaties gelijk aan 41 bij de raffinaderijen en het grootste aantal is gelijk aan 256 bronnen bij chemie. In tegenstelling tot wat men zou verwachten is het aantal mogelijke combinaties bij de sectorale gegevens meestal kleiner dan bij de bedrijfsgegevens. Dit komt omdat hier diverse bronnen met een zelfde type milieutechnologie geaggregeerd worden tot één bron-milieutechnologie combinatie. Ter illustratie: voor de NOx-emissiereductie bij de elektriciteitscentrales zijn in de sectorale data slechts 5 bron-milieutechnologie combinaties te vinden, terwijl er in de bedrijfsdata 100 bron-milieutechnologie combinaties zijn (voor SO<sub>2</sub> zijn er respectievelijk 4 en 19 combinaties). In Bijlage 3.2 staan per verzameling alle typen milieutechnologie en het aantal combinaties met het

betreffende type die in deze studie zijn gebruikt. Het toepassen van één type milieutechnologie in meerdere typen emissiebronnen komt vaak voor. Voor emissiereductie van koper naar water zijn er 4 bron-milieutechnologie combinaties en 4 typen milieutechnologie, terwijl er in de verzameling voor NO<sub>x</sub> emissiereductie in de chemische industrie maar liefst 256 combinaties zijn waarbij één type milieutechnologie in gemiddeld 26 bronnen kan worden toegepast. Zo kunnen in de chemische industrie vooral low NO<sub>x</sub>-branders (bij 102 bronnen) en de Selectieve Katalytische Reductie (SCR) bij 128 bronnen worden toegepast om NO<sub>x</sub> te reduceren. Deze twee typen milieutechnologie kunnen dus bij 230 uit het totaal van 256 combinaties worden toegepast; in de resterende 26 combinaties kunnen 8 andere typen milieutechnologie worden ingezet. Om SO<sub>2</sub> emissie te reduceren kunnen bij de meeste bronnen in uiteenlopende sectoren loogwassers worden toegepast.

Er is doorgaans voldoende effectieve milieutechnologie al beschikbaar om zeer vergaande emissiereductie te bereiken. De effectiviteit is dus meestal hoog. In 13 van de 19 verzamelingen met sectorale data kan een cumulatieve (totale) emissiereductie van meer dan 66% van de onbestreden emissie worden gerealiseerd. In 8 verzamelingen met sectorale data en in alle verzamelingen met bedrijfsdata kan een emissiereductie van meer dan 75% van de onbestreden emissie worden bereikt. Wel zijn er grote verschillen tussen de verzamelingen; bijvoorbeeld het maximale emissiereductiepercentage van fenol is slechts circa 8%, maar die van fosfaat is liefst 97%. In de bedrijfsdata is de cumulatieve maximale emissiereductie doorgaans ver boven 80% ten opzichte van de onbestreden emissie. Dit komt omdat in de bedrijfsdata vele emissiebronnen zijn meegenomen. Ter illustratie, de schaal van de emissiereductie per combinatie voor NO<sub>x</sub>-emissiereductie in de metaalindustrie varieert van 3 kg bij de kleinste emissiebron tot 1,3 miljoen kg bij de grootste bron. Er zijn dus zeer kleine en zeer grote bronnen in een verzameling. In de sectorale data zijn doorgaans grote bronnen meegenomen.

Uit Tabel 3.5 blijkt de grote spreiding in de marginale emissiereductiekosten. Zo zijn de laagste kosten per kg emissiereductie voor CO<sub>2</sub> (cr<sub>1</sub>) minder dan 0,0007 gulden en de hoogste kosten (cr<sub>82</sub>) bijna 3 gulden per kg (bijna 4.300 keer hoger), voor toluen lopen de kosten uiteen van 0,1 gulden per kg tot circa 1.000 gulden per kg emissiereductie (10.000 keer), voor NO<sub>x</sub> in de metaalindustrie van minimaal 0,2 gulden per kg emissiereductie tot 34.957 gulden per kg emissiereductie (zelfs 175.000 keer). Dit ligt voor de hand want de bronnen hebben uiteenlopende proces- en productkenmerken en de schaal van de emissiereductie varieert extreem. Ook is goed verklaarbaar dat de marginale kosten in de bedrijfsdata hoger zijn dan de gemiddelde marginale emissiereductiekosten in de sectorale data omdat in de sectorale data de extreem hoge kosten van een enkele bron worden uitgemiddeld door de aggregatie van bronnen. Om dit te illustreren zijn in de Tabel 3.6 het maximale emissiereductiepercentage en de hoogste gemiddelde marginale emissiereductiekosten voor SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> emissiereductie onder elkaar gezet. Deze data betreffen de sectorale data als geheel, alsmede sectorale data in de elektriciteitssector (een gemiddelde van enkele bronnen voor de elektriciteitssector) en bedrijfsdata. Het maximale emissiereductiepercentage van de

sectorale en bedrijfsdata in de elektriciteitscentrales verschilt nauwelijks, maar de hoogste marginale kosten in de sectorale data zijn veel lager dan de marginale kosten in de bedrijfsdata.

Tabel 3.6 Maximaal emissiereductiepercentage (max. R) en maximale marginale emissiereductiekosten (max. cr) in de sectorale en bedrijfsdata.						
R: % onbestreden cr: gulden/kg	Sectorale data, alle bron-milieutechnologie combinaties		Sectorale data, alleen elektriciteitcentrales		Bedrijfsdata, bronnen bij elektriciteitcentrales	
	max. R	max. cr	max. R	max. cr	max. R	max. cr
SO <sub>2</sub>	87 %	8	94 %	1,01	96 %	11
NO <sub>x</sub>	77 %	51	92 %	7,68	93 %	214

In enkele verzamelingen komen bron-milieutechnologie combinaties voor met extreem lage of extreem hoge marginale emissiereductiekosten. Hiermee bedoelen wij één tot twee uitschieters van de laagste of hoogste marginale kosten - aan het begin of aan het einde van emissiereductiekostenfuncties - die meer dan tien keer de marginale kosten van de daaropvolgende of van de voorafgaande combinatie overtreffen. Om na te gaan wat de effecten van de uitschieter op de uitkomst zijn, werden de analyses uitgevoerd met alle data en met de data zonder de uitschieters. Er blijkt weinig verschil in de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de resultaten van de ramingen met en zonder de uitschieters.

### De kostenschattingen

Aan de hand van de hiervoor beschreven verzamelingen wordt nagegaan in hoeverre de marginale en de totale emissiereductiekosten nauwkeurig en betrouwbaar kunnen worden geschat. De schattingen zijn gedaan met behulp van alle empirische data ( $kcr_0$ ), aan de hand van twee ad random geselecteerde bronnen ( $kcr_1$ ) en op basis van de hoogste en de laagste marginale kosten ( $kcr_2$ ). De berekening is uitgevoerd voor alle verzamelingen van bron-milieutechnologie combinaties met sectorale data en met bedrijfsdata, maar dan geschoond van de uitschieters.

De kernvraag is of het mogelijk is op basis van beperkte informatie, namelijk de kosten van niet meer dan twee bron-milieutechnologie combinaties, tot een voldoende nauwkeurige en betrouwbare kostenschatting te komen. Zoals in paragraaf 3.4 is uitgelegd, is de kostenfunctie geschat met de functionele vorm  $cr_{i+m} = cr_i * e^{nkcr}$ . Om op basis van twee bekend veronderstelde combinaties de coëfficiënt te kunnen berekenen moet naast de informatie over de kosten van elk van die combinaties tevens het aantal combinaties dat ertussen ligt bekend zijn, terwijl bij de schatting met twee ad random bronnen ook het aantal combinaties met lagere en met hogere marginale kosten bekend moet zijn. De nauwkeurigheid van de raming van de marginale kosten is berekend door de berekende marginale kostencijfers te correleren met de empirische kosten. Als nauwkeurigheidseis geldt dat de correlatiecoëfficiënt groter moet zijn dan 0,9. Indien niet alleen het aantal bron-

milieutechnologie combinaties bekend is, maar tevens het potentieel voor emissiereductie van elke combinatie, alsmede de volgorde qua kosten, dan kan met behulp van de geschatte marginale kostenfunctie de totale kostenfunctie worden berekend. Als betrouwbaar geldt dat de geschatte totale kosten niet meer dan dertig procent naar boven (index 130) of naar beneden (index 70) mogen afwijken van de empirische totale kosten.

De uitgevoerde berekening heeft het karakter van een ‘alsof’ benadering. Het ‘alsof’ bestaat hierin dat wordt aangenomen dat de gebruikte databestanden de werkelijke kosten van emissiereductie voor verschillende typen emissie weergeven. Er wordt nagegaan of die veronderstelde werkelijke kosten te benaderen zijn met kostenramingen op basis van de kosteninformatie over niet meer dan twee combinaties, plus aanvullende informatie over het aantal mogelijke combinaties en hun emissiereductie - potentieel.

De resultaten van de schattingen, exclusief de uitschieters, staan in Tabel 3.7. In kolom 1 staan de namen van de verzamelingen, tussen haakjes staat het aantal combinaties. In kolommen 2, 3 en 4 staan de berekende exponenten,  $kcr_0$ ,  $kcr_1$ ,  $kcr_2$  op basis van de rekenmethode die in de vorige paragraaf is toegelicht. In kolommen 5, 6 en 7 staan de correlaties tussen de marginale kosten in de empirische data en de kostenschattingen. Kolommen 8, 9 en 10 geven de geschatte totale kosten van alle combinaties in de verzameling uitgedrukt als percentage van de totale empirische kosten. De resultaten zijn in Schema 3.1 samengevat. Aangegeven is het aantal keren dat kostenschattingen met behulp van de exponenten voldoende nauwkeurig en betrouwbaar zijn gebleken.



Tabel 3.7 Vergelijking tussen kostenschattingen en empirische data, exclusief uitschieters									
Verzamelingen van combinaties	Grootte van exponenten			Correlatiecoëfficiënt van de geschatte en de empirische data			Betrouwbaarheid: kostenschatting gedeeld door empirische data *100		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Emissie (aantal combinaties)	kcr <sub>0</sub>	kcr <sub>1</sub>	kcr <sub>2</sub>	kcr <sub>0</sub>	kcr <sub>1</sub>	kcr <sub>2</sub>	kcr <sub>0</sub>	kcr <sub>1</sub>	kcr <sub>2</sub>
<b>Sectorale data</b>									
Benzeen (13)	0,58	1,74	0,59	0,97	0,87	0,97	94	116	103
Cadmium (4)	2,06	2,52	1,98	0,96	0,95	0,96	106	25	85
CO <sub>2</sub> (79)	0,09	0,14	0,09	0,95	0,96	0,85	100	12395	85
Koper (4)	1,06	1,25	0,94	0,89	0,87	0,91	133	226	92
Fijne stof (13)	0,22	0,32	0,24	0,97	0,98	0,97	90	97	103
Fluoride (8)	0,87	0,86	0,89	0,99	0,99	0,99	103	105	114
Fosfaat (10)	0,36	0,27	0,40	0,98	0,96	0,98	118	59	140
Metalen lucht (13)	0,20	0,48	0,22	0,97	0,95	0,97	114	92	125
Metalen water (14)	0,19	0,33	0,18	0,97	0,92	0,97	100	170	94
NH <sub>3</sub> (10)	0,11	0,06	0,10	0,98	0,99	0,98	101	110	94
NOx (99)	0,05	2,31	0,05	0,96	0,97	0,97	71	25	52
PAK's (6)	0,40	0,26	0,46	0,94	0,91	0,95	98	73	119
Fenol (7)	0,68	0,47	0,68	0,97	0,97	0,97	79	62	71
Propyleen (7)	0,54	0,68	0,57	0,98	0,98	0,98	97	162	105
SO <sub>2</sub> (35)	0,07	0,06	0,06	0,91	0,92	0,92	93	86	87
Styreen (15)	0,24	0,20	0,26	0,97	0,96	0,97	97	90	106
Tolueen (20)	0,52	0,43	0,51	0,95	0,97	0,96	80	88	55
VOS (47)	0,07	0,06	0,07	1,00	0,99	1,00	102	87	105
Zink (6)	0,87	0,70	0,86	0,98	0,99	0,98	97	225	85
<b>Bedrijfsdata</b>									
Cl-metaal (23)	0,27	0,17	0,27	0,98	0,97	0,98	98	169	95
NOx chemie (253)	0,04	0,04	0,04	0,98	0,98	0,98	76	100	100
NOx elektriciteitsproductie (97)	0,06	0,05	0,05	0,88	0,92	0,91	100	29	65
NOx metaal (70)	0,11	0,17	0,10	0,96	0,89	0,97	67	515	46
NOx raffinaderijen (39)	0,06	0,07	0,07	0,97	0,99	0,98	96	105	105
SO <sub>2</sub> chemie (53)	0,13	0,13	0,14	0,89	0,89	0,90	101	98	139
SO <sub>2</sub> elektriciteitsproductie (17)	0,14	0,03	0,14	0,92	0,93	0,92	131	404	123
SO <sub>2</sub> metaal (43)	0,10	0,05	0,09	0,97	1,00	0,98	81	161	65
SO <sub>2</sub> raffinaderijen (17)	0,14	0,15	0,15	0,98	0,98	0,98	108	105	110

Schema 3.1 Samenvatting van de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de kostenschattingen voor 28 verzamelingen (19 met sectorale data, 9 met bedrijfsdata)			
	$kcr_0$ : alle data zijn bekend	$kcr_1$ : twee willekeurige data	$kcr_2$ : hoogste en laagste kosten
Nauwkeurigheid van marginale kosten: Correlatie tussen schatting en empirische data $> 0,9$	Totaal 25 uit 28: 18 van 19 sectordata 7 van 9 bedrijfsdata	Totaal 24 uit 28: 17 van 19 sectordata 7 van 9 bedrijfsdata	Totaal 27 uit 28: 18 van 19 sectordata 9 van 9 bedrijfsdata
Betrouwbaarheid van de totale kosten: Percentuele afwijking $< 30\%$	Totaal 25 uit 28: 18 van 19 sectordata 7 van 9 bedrijfsdata	Totaal 14 uit 28: 10 van 19 sectordata 4 van 9 bedrijfsdata	Totaal 21 uit 28: 16 van 19 sectordata 5 van 9 bedrijfsdata

De nauwkeurigheid van de marginale kosten is in de meeste schattingen voldoende. Het verband tussen de empirische data en de geschatte data met behulp van de exponenten voldoet doorgaans aan de eis dat de correlatie groter dan 0,9 moet zijn. Als alle empirische data bekend zijn (de exponent  $kcr_0$ ) dan worden 25 van de 28 kostenfuncties nauwkeurig geschat. Bij een schatting van de marginale kostenfunctie op basis van twee ad random empirische data (de exponent  $kcr_1$ ) blijken toch nog 24 van 28 kostenfuncties nauwkeurig geschat en op basis van de hoogste en de laagste marginale kosten (de exponent  $kcr_2$ ) zijn voor 27 van de 28 verzamelingen voldoende nauwkeurige schattingen gemaakt. De resultaten bevestigen de hypothese die in paragraaf 3.3 is toegelicht, namelijk dat de marginale emissiereductiekostenfunctie exponentieel is en in theorie consecutief kan worden geschat met behulp van een functie met een exponentiële vorm  $cr_{i+m} = cr_i * e^{kcr}$ . Het blijkt verder dat de nauwkeurigheid van een schatting op basis van slechts twee bron-milieutechnologie combinaties nauwelijks onderdoet voor een raming op basis van alle combinaties. In Bijlage 3.3 zijn de emissiereductiekosten geschat met de lineaire schattingsmethoden op basis van het gewogen gemiddelde van twee bronnen en op basis van de lineaire interpolatie tussen twee bronnen. Deze ramingen wijzen erop dat alle lineaire ramingen onnauwkeurig en onbetrouwbaar zijn.

Bij het schatten van de kosten gaat het erom de gevolgen van de milieueisen voor de totale kosten te bepalen. Een afwijking van de geschatte totale kosten ten opzichte van de empirische data van minder dan 30% wordt acceptabel geacht. De schattingen van de totale kosten in het geval alle empirische data bekend zijn, levert voor 25 van de 28 gevallen betrouwbare kostenramingen. De schatting op basis van twee willekeurige combinaties levert bij slechts 14 van de 28 voldoende betrouwbare ramingen op. Voor enkele emissies zijn forse afwijkingen te vinden, meer dan de factor 2 (ruim 100%). De schattingen op basis van de gegevens over de bronnen met de hoogste en de laagste

marginale kosten zijn betrouwbaar in 21 van de 28 gevallen. De schattingen zijn nauwkeurig indien informatie beschikbaar is over de bronnen met de hoogste en laagste marginale kosten en het aantal bron-milieutechnologie combinaties in de verzameling. Om een redelijk betrouwbare kostenschatting te maken is nog aanvullende milieutechnische informatie nodig, namelijk de schaal van de emissiereductie per combinatie en de volgorde van de combinaties in relatie tot de geschatte marginale kosten.

De conclusie is dat bij slechts twee empirische metingen de discontinue empirische kostenfunctie nauwkeurig kan worden geschat als er wordt uitgegaan van de bronnen met de laagste en de hoogste kosten. In de praktijk kan het aantal combinaties worden bepaald met behulp van de inventarisaties van alle typen bronnen en typen milieutechnologie. Ook de schaal van de emissiereductie per bron- milieutechnologie combinatie kan doorgaans op basis van milieutechnische informatie goed worden berekend. Daarentegen levert de kostenvolgorde van de combinaties in relatie tot de schaal van de emissiereductie wel moeilijkheden. Om de volgorde van de combinaties op de ordinale schaal te bepalen moet er een verband tussen de marginale kosten en de schaal van emissiereductie worden gevonden. Het bepalen van de marginale kostenvolgorde van bron-milieutechnologie combinaties zou betrouwbaarder zijn als er een eenduidige relatie bestaat tussen de schaal van de emissiereductie en de marginale of gemiddelde emissiereductiekosten. Hieronder wordt nagegaan of er zo'n direct verband tussen de schaal van de emissiereductie en de marginale emissiereductiekosten bestaat, met andere woorden: in hoeverre doen zich bij emissiereductie schaalvoordelen of schaalnadelen voor.

### 3.6 Schaaleffecten bij emissiereductie

Schaalvoordelen kunnen zich voordoen als de productieschaal van een specifiek uniform product wordt vergroot. Toegepast op emissiereductie zou dit betekenen dat bij verhoging van een specifieke productiecapaciteit (door een grotere installaties of een hogere intensiteit van het proces) de totale emissiereductiekosten niet evenredig, maar minder sterk stijgen, bijvoorbeeld bij de verdubbeling van de onbestreden emissies van een productieproces zou ook de potentiële emissiereductie verdubbelen, maar de totale kosten zouden dan minder dan de factor twee toenemen. Dergelijke schaalvoordelen (*economies of scale*) kunnen zich voordoen op grond van ondeelbaarheden in de milieutechnologie. Kleine emissiebronnen hebben in dat geval te maken met relatief hoge vaste gemiddelde kosten van afschrijving en interestlasten, waardoor ze gemiddeld hoge kosten per eenheid emissiereductie maken. De aanname dat schaalvoordelen zich in milieutechnologie voordoen, is in de *cost engineering* gangbaar en wordt in de industrie gebruikt om milieuinvesteringen te beoordelen voordat ze in detail worden uitgewerkt. In dit kader wordt de zogenoemde schaalfactor R berekend [Remer et al., 1994]. De berekening is formeel:  $R = [\log(\text{cost}_2/\text{cost}_1)] / [\log(\text{size}_2/\text{size}_1)]$

De schaalfactor geeft aan hoe sterk de totale emissiereductiekosten als functie van de emissieomvang zullen toe- of afnemen. Studies naar toepassingen van milieutechnologie in de industrie wijzen erop dat de schaalfactoren voor elke milieutechnologie processpecifiek zijn en dat ze Milieu en Innovatie

tussen 0,2 en 0,8 liggen, ofwel dat de totale kosten van een milieutechnische installatie weinig tot sterk van de emissieomvang afhangen.

Als de schaal inderdaad een belangrijke invloed op de emissiereductiekosten heeft dan zou het mogelijk zijn om met weinig data kostenschattingen te maken zonder kennis over de ordinale schaal, namelijk door de emissiereductie en de kosten daarvan bij een zeer grote en een zeer kleine emissiebron te meten, waarna de kosten bij andere bronnen met de schaalfactor kunnen worden geïnterpoleerd. Het toetsen in hoeverre zich schaalvoordelen bij milieutechnologie voordoen is ook van belang voor de wijze waarop milieueisen worden ingevoerd. Indien schaalvoordelen zich inderdaad voordoen, zullen de marginale kosten bij een gegeven emissiereductiepercentage, lager zijn naarmate de omvang van de onbestreden emissie van een bron groter is. Een efficiënte aanpak in het milieubeleid is dan om, gegeven de benodigde totale emissiereductie bij een verzameling van bronnen, de strengste eisen aan de grootste bron te stellen, want daar zijn de laagste (gemiddelde) marginale kosten te verwachten. Er is dus wel wat voor te zeggen om het optreden van schaalvoordelen bij emissiereductie nader te onderzoeken.

De verwachting is dus dat voorspellingen van de emissiereductiekosten op basis van algemene proces- en productkenmerken van bedrijven in een branche weinig nauwkeurig en betrouwbaar zullen zijn, ook al worden er bronnen van gelijke schaal geselecteerd. Evenmin zullen verschillen in de kosten tussen bedrijven uitsluitend uit verschillen in de schaal van de emissiereductie te verklaren zijn. Wel is op grond van de *cost engineering* te verwachten dat de schaal een belangrijke invloed op de kosten in *homogene* verzamelingen heeft, dat wil zeggen: in de verzamelingen van bronnen met goed vergelijkbare kenmerken en één type milieutechnologie. In deze paragraaf wordt nagegaan in hoeverre de emissiereductiekosten nauwkeurig en betrouwbaar kunnen worden voorspeld indien men rekening houdt met de schaal van de emissiereductie.

### **Kostenschattingen op basis van schaalgrootte**

Wanneer de schaalvoordelen zich sterk voordoen, kan de toename van de marginale kosten - geordend op basis van emissiereductie- nauwkeurig en betrouwbaar worden geschat. Net als in paragraaf 3.4 en 3.5 wordt de methode van kostenschatting aan de hand van fluoride emissiereductie toegelicht, waarna de resultaten voor de andere verzamelingen worden getoond. In Tabel 3.8 staan de kostenfuncties van fluoride emissiereductie weergegeven, zowel de empirische kostenfunctie als de geschatte kostenfunctie. De empirische kostenfunctie is geconstrueerd door de bron-milieutechnologie combinaties met de grootste emissiereductie op de eerste plaats te zetten, hierna de combinatie met de op één na de grootste reductie, enzovoorts. Als zich inderdaad schaalvoordelen voordoen, zou de eerste combinatie, dus de combinatie met de grootste emissiereductie, de laagste marginale kosten moeten hebben. De tweede combinatie zou iets hogere kosten moeten hebben, enzovoorts. Bij schaalvoordelen zal de empirische marginale kostencurve dus toe moeten nemen. Uit de tabel blijkt echter dat dit niet het geval is.

Tabel 3.8 Schatting van marginale kosten op basis van ordening naar de schaal van emissiereductie (* twee willekeurige combinaties)						
	Empirische data			Geschatte marginale kosten met alle empirische data $k_{cr_{er0}}$ , met twee willekeurige data $k_{cr_{er1}}$ en met de grootste en kleinste bron $k_{cr_{er2}}$		
	Emissie reductie Er	Totale kosten Cr	Marginale kosten cr	(1) $k_{cr_{er0}}=0,66$	(2) $k_{cr_{er1}}=4,60$	(3) $k_{cr_{er2}}=0,46$
3	570000	10000000	18	18	0,0	18
6	120000	20000000	167	112	0,2	28
2	33000	500000	15	178	*15	44
8	30000	45000000	1500	283	*1500	70
5	26000	2500000	96	449	148474	112
1	18000	54000	3	714	(zeer groot)	178
4	12000	500000	42	1135	(zeer groot)	283
7	1000	450000	450	1805	(zeer groot)	450
Totaal	810000	79004000		$\textcircled{R} = 0,00$ $\textcircled{C} = 98\%$	$\textcircled{R} = 0,13$ $\textcircled{C} = \text{n.v.t}$	$\textcircled{R} = 0,00$ $\textcircled{C} = 34\%$

De schattingen van de marginale kosten in de verzameling zijn op dezelfde wijze gemaakt als in paragraaf 3.4: (1) een marginale kostenfunctie op basis van alle empirische data, (2) op basis van twee willekeurige combinaties (hier zijn nummers 2 en 8 per toeval geselecteerd), waarna de kosten bij de andere bronnen zijn geëxtrapoleerd (3) op basis van de grootste en de kleinste bron, waarna de kosten voor de andere bronnen zijn geïnterpoleerd. Bij fluoride emissiereductie blijkt dat kostenschattingen met de exponenten waarbij de combinaties in de verzameling naar schaalgrootte zijn geordend, onvoldoende nauwkeurig en betrouwbaar zijn. De correlatie tussen de geschatte en de empirische marginale kosten blijven met waarden  $\textcircled{R} = 0,00$  en  $0,13$  ver beneden het criterium van  $0,9$ . De kostenschatting met behulp van alle data (1) is weliswaar betrouwbaar, er is slechts 2% onderschatting ( $\textcircled{C} = 98\%$ ), maar dat kan op toeval berusten want de afwijkingen per combinatie zijn groot (honderden procenten). De schattingen met de andere twee methoden (2) en (3) zijn onbetrouwbaar want de afwijkingen ten opzichte van empirische data zijn groot.

De vraag is nu of de fluoride emissiereductie een uitzonderingsgeval is of representatief is voor de andere empirische waarnemingen. Voor alle 28 verzamelingen van bron-milieutechnologie combinaties die in paragraaf 3.5 zijn besproken, zijn de marginale kosten geschat, uitgaande van de dalende volgorde van de emissiereductieschaal, op basis van empirische data van de grootste en de kleinste bron (exponent  $ker_2$ ). Nagegaan zijn de nauwkeurigheid en de betrouwbaarheid van de kostenschattingen. De resultaten staan in Schema 3.2 samengevat terwijl de resultaten per verzameling in Bijlage 3.3 te vinden zijn, waarin ook de resultaten van diverse schattingsmethoden vergeleken zijn.

Schema 3.2 Samenvatting van de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de kostenschattingen voor 28 verzamelingen (19 met sectorale data, 9 met bedrijfsdata) uitgaande van de grootste en de kleinste bron en van de bron met de hoogste en de laagste marginale kosten		
	Ker <sub>2</sub> : grootste en kleinste bron	kcr <sub>2</sub> : hoogste en laagste kosten
Nauwkeurigheid:	Totaal 15 uit 28	Totaal 27 uit 28
Correlatie van schatting met empirische data > 0,9	8 van 19 sectordata 7 van 9 bedrijfsdata	18 van 19 sectordata 9 van 9 bedrijfsdata
Betrouwbaarheid:	Totaal 7 uit 28	Totaal 21 uit 28
Percentuele afwijking < 30%	3 van 19 sectordata 4 van 9 bedrijfsdata	16 van 19 sectordata 5 van 9 bedrijfsdata

De schattingen uitgaande van de grootste en kleinste bron zijn uiteindelijk veel minder nauwkeurig en betrouwbaar dan de schattingen uitgaande van de bronnen met de laagste en de hoogste marginale kosten. Kortom, de emissiereductie bij de grootste bronnen is bijna lange na niet altijd de goedkoopste optie. Dit geldt met name voor de sectorale gegevens. Het valt op dat in de berekeningen op basis van de bedrijfsgegevens de verschillen tussen de twee methodes kleiner zijn dan bij gebruik van sectorale gegevens. Het feit dat betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van de kostenschattingen van deze twee methoden bij de bedrijfsgegevens beter overeenkomen dan bij sectorale gegevens zou erop kunnen wijzen dat zich binnen de bedrijfsgegevens wel schaalvoordelen voordoen. Het is aannemelijk dat het resultaat samenhangt met het feit dat in de sectorale data sterk uiteenlopende typen emissiebronnen voorkomen (heterogene verzamelingen) terwijl in de bedrijfsdata meer vergelijkbare bronnen te vinden zijn (homogene verzamelingen).

### **Kostenschattingen op basis van schaalgrootte in homogene verzamelingen**

Nu moet worden nagegaan in hoeverre het mogelijk is om betrouwbare kostenschattingen voor de homogene verzamelingen te maken. Om de vraag te beantwoorden zijn uitsluitend de verzamelingen met bedrijfsdata gebruikt waarmee bron-milieutechnologie combinaties in deelverzamelingen zijn ingedeeld naar het type milieutechnologie en de schaalgrootte van emissiereductie. De volgende typen milieutechnologie zijn onderscheiden: (a) NO<sub>x</sub> emissiereductie met lage NO<sub>x</sub>-branders in chemie en in elektriciteitsproductie, (b) NO<sub>x</sub> emissiereductie met SCR (Selectieve Katalytische Reductie) in chemie, in elektriciteitsproductie en in raffinaderijen, (c) SO<sub>2</sub> emissiereductie met loogwasser in de chemie en in de metaalindustrie. In elke deelverzameling is de schaalgrootte van de combinaties in vier clusters ingedeeld: de emissiereductie groter dan 400 ton per jaar, tussen 400 en 200 ton per jaar, tussen 200 en 100 ton emissiereductie per jaar en kleiner dan 100 ton emissiereductie per jaar. Daarmee zijn redelijk homogene clusters van bron-milieutechnologie combinaties samengesteld, namelijk: één type emissie, één sector, één type milieutechnologie, één schaal. Idealiter zouden de

individuele bedrijven per sector ook naar productie- en productkenmerken moeten worden opgesplitst maar deze data zijn niet beschikbaar. Per cluster zijn de totale kosten gedeeld door de totale emissiereductie van de cluster. Aldus verkrijgt men per cluster de gemiddelde kosten per eenheid emissiereductie. Door deze in volgorde te zetten, zijn ze te interpreteren als marginale kosten bij afnemende schaal van emissiereductie. Dit is te vinden in Tabel 3.9.

Tabel 3.9 Gemiddelde emissiereductiekosten in guldens per kg emissiereductie, per cluster in homogene verzamelingen verdeeld naar schaal				
	Clusters van emissiereductieschaal			
	> 400	400-200	200-100	<100
<b>NOx emissiereductie met lage NOx-branders</b>				
<b>Chemie</b> , aantal combinaties	7	6	12	77
Kosten per eenheid emissiereductie	1,03	1,34	1,07	1,31
<b>NOx emissiereductie met SCR</b>				
<b>Chemie</b> , aantal combinaties	7	10	13	98
Kosten per eenheid emissiereductie	5	13	30	74
<b>Elektriciteitscentrales</b> , aantal combinaties	16	28	2	3
Kosten per eenheid emissiereductie	10	38	33	85
<b>Raffinaderijen</b> , aantal combinaties	2	5	2	13
Kosten per eenheid emissiereductie	15	24	30	49
<b>SO<sub>2</sub> reductie met loogwassers</b>				
<b>Chemie</b> , aantal combinaties	4	1	2	40
Kosten per eenheid emissiereductie	2	5	9	101
<b>Metaalindustrie</b> , aantal combinaties	4	4	3	25
Kosten per eenheid emissiereductie	7	41	20	49

Tabel 3.9 laat zien dat de kosten per eenheid emissiereductie als functie van de afnemende schaal van emissiereductie slechts in enkele deelverzamelingen exponentieel toenemen. Dit is zonder meer het geval voor de NOx-emissiereductie met behulp van SCR in de chemie en raffinaderijen. Het verband is minder duidelijk voor de NOx emissiereductie met lage NOx-branders in chemie en voor de SO<sub>2</sub>-emissiereductie in de chemie. Bij de NOx-emissiereductie met SCR in de elektriciteitscentrales en de SO<sub>2</sub>-emissiereductie met een loogwasser in de metaalindustrie is er geen eenduidig verband tussen de marginale kosten en de schaal van emissiereductie; daar zijn blijkbaar de specifieke proces- en productkenmerken van belang voor de kosten. Voorts is het type milieutechnologie relevant; zo zijn de kosten van de lage NOx-branders over de gehele schaal van emissiereductie lager dan de kosten van SCR. Hieruit blijkt dat schaalvoordelen zich duidelijker gaan aftekenen naarmate de onderscheidende (deel-)verzamelingen van bron-milieutechnologie combinaties homogener zijn. Maar tevens blijkt dat de schaal van emissiereductie slechts één van de kostenbepalende factoren is, naast product- en proceskenmerken en de keuze van het type milieutechnologie.

Het feit dat de schaal slechts één van de kostenbepalende factoren is, maakt de kostenschatting onbetrouwbaar indien uitgegaan wordt van de hypothese dat de volgorde van marginale kosten wordt bepaald door de schaal van emissiereductie. Dit geldt zelfs voor de redelijk homogene verzamelingen, hetgeen bevestigd wordt met behulp van de kostenschatting voor de hierboven genoemde clusters,

waarbij de combinaties naar schaalgrootte geordend zijn, dus de grootste bronnen eerst, dan de op één na de grootste bronnen, enzovoorts (zoals in het fluoride voorbeeld). Daarbij is aangenomen dat de schaal van emissiereductie en de gemiddelde kosten van de eerste en de laatste combinatie in iedere cluster -waarbij dus de eerste combinatie de grootste schaal heeft en de laatste de kleinste- bekend zijn. De kostenexponent wordt berekend aan de hand van de hoogste en laagste gemiddelde kosten per cluster, waarna de kosten bij de overige bronnen consecutief berekend zijn (de formule is:  $cr_{i+1} = cr_i * e^{ker}$ ). Op dezelfde wijze is de schaalexponent  $ker$  berekend ( $ker = \ln [er_n/e_1]/(n-1)$ ), waarna ook de schaal van de overige bronnen is berekend (volgens de formule:  $er_{i+1} = er_i * e^{ker}$ ). De raming van de totale kosten  $Cr$  per cluster is: gemiddelde kosten per kg emissiereductie maal de schaal van de emissiereductie. Een schatting wordt betrouwbaar geacht indien de over- of onderschatting ten opzichte van de empirische data minder is dan 30%.

In Tabel 3.10 staan de resultaten voor NO<sub>x</sub>- en SO<sub>2</sub>-emissiereductie gepresenteerd, waarbij de combinaties binnen de clusters in volgorde van oplopende schaal zijn geordend. De ramingen tonen 32 clusters, waarvan er 7 een onvoldoende aantal combinaties herbergen (minder dan 3 combinaties per cluster) om uitspraken te kunnen doen. Uit de berekeningen blijkt dat van de 25 overblijvende kostenschattingen er 11 voldoende betrouwbaar zijn. De meeste schattingen voor homogene verzamelingen van bron-milieutechnologie combinaties op basis van schaalfactoren zijn dus onvoldoende betrouwbaar. Indien de combinaties per cluster geordend worden naar toenemende kosten per combinatie, dan stijgt het aantal betrouwbare schattingen tot 13 van de 25 clusters. Al met al zijn de kostenschattingen ook in de homogene verzamelingen te vaak onvoldoende betrouwbaar om de emissiereductiekosten goed te kunnen voorspellen. Uit de vergelijking van de ramingen op basis van ordening naar schaal van emissiereductie en naar de marginale kosten blijkt dat de bronspecifieke proces- en productkenmerken een sterke invloed op de emissiereductiekosten hebben.



Tabel 3.10 Betrouwbaarheid van kostenschatting voor homogene verzamelingen				
	Schaal van emissiereductie			
	> 400	400-200	200-100	<100
<b>NOx emissiereductie</b>				
<b>Chemie, lage NOx-branders</b>				
aantal combinaties	7	6	12	77
schatting/empirisch	42%	159%	48%	50%
<b>NOx-emissiereductie met SCR</b>				
<b>Chemie, Selectieve Katalytische Reductie</b>				
Aantal combinaties	7	10	13	98
Schatting/empirisch	60%	97%	116%	62%
<b>Elektriciteitscentrales, lage NOx-brander</b>				
Aantal combinaties	34			2
Schatting/empirisch	82%			100%
<b>Elektriciteitscentrales, SCR</b>				
Aantal combinaties	16	28	2	3
Schatting/empirisch	94%	84%	100%	125%
<b>Metaalindustrie, substitutie kolen door gasverbranding</b>				
Aantal combinaties	4			36
Schatting/empirisch	2%			34%
<b>Raffinaderijen, SCR</b>				
Aantal combinaties	2	5	2	13
Schatting/empirisch	100%	98%	100%	115%
<b>SO<sub>2</sub> emissiereductie</b>				
<b>Chemie, loogwasser</b>				
Aantal combinaties	4	1	2	40
Schatting/empirisch	124%	100%	100%	163%
<b>Elektriciteitscentrales rookgasreiniging</b>				
Aantal combinaties	18			
Schatting/empirisch	81%			
<b>Metaalindustrie, loogwasser</b>				
Aantal combinaties	4	4	3	25
Schatting/empirisch	62%	88%	90%	162%
<b>Raffinaderijen, ESP/loogwasser</b>				
Aantal combinaties	13		3	1
Schatting/empirisch	207%		126%	100%

### 3.7 Betekenis van de resultaten

De vraag van dit hoofdstuk luidt: is het mogelijk om op betrekkelijk eenvoudige en goedkope wijze de kosten te schatten die bedrijven moeten maken als de overheid strenge milieueisen zou gaan stellen. Deze algemene vraag wordt gesteld, omdat enerzijds het beleidsuitgangspunt is dat milieukosten voor bedrijven acceptabel dienen te zijn, terwijl anderzijds onzeker is in hoeverre de overheid dit bij de voorbereiding van strengere milieueisen kan beoordelen. Bij de voorbereiding van de eisen zijn immers alleen kostengegevens van enkele demonstratieprojecten beschikbaar, terwijl de milieueisen voor vele emissiebronnen gelden. De neoklassieke theorie biedt geen houvast om de kosten bij vele bronnen te voorspellen. De cost engineering modellen, die kostenbeïnvloedende procesvariabelen analyseren, zijn kostbaar en de betrouwbaarheid van de resultaten daarvan wordt aangevochten. In dit Milieu en Innovatie

hoofdstuk is een empiristische aanpak gevolgd om de kosten te schatten voor een hele verzameling van bron-milieutechnologie combinaties op basis van zeer beperkte kosteninformatie, namelijk over twee combinaties. Daartoe werd gebruik gemaakt van de kostenfunctie van de vorm  $cr_{i+1} = cr_i * e^{kr}$ .

De hypothese dat de emissiereductiekostenfuncties exponentieel oplopen met natuurlijke logaritme als grondslag, is getoetst en bevestigd aan de hand van 28 empirische kostenfuncties die een verzameling vormen van bron-milieutechnologie combinaties in diverse sectoren en bij bedrijven binnen één sector. Het blijkt dat gebruikmakend van kosteninformatie over de bron met de hoogste en de laagste kosten plus aanvullende informatie over het aantal beschikbare combinaties, de empirische marginale kostenfuncties voldoende nauwkeurig ( $R^2 > 0,9$ ) konden worden benaderd in 27 van de 28 gevallen. Met de bekend veronderstelde kostenvolgorde van de combinaties en de schaal van emissiereductie per combinatie, konden bovendien de totale kosten worden geschat. De afwijking van empirische totale kosten van minder dan 30% in 21 van de 28 gevallen. Verder blijkt uit de ramingen dat de schaal van emissiereductie de kosten minder sterk beïnvloedt dan de bronspecifieke proces- en productkenmerken maar welke daarvoor bepalend zijn, is onbekend. Echter, het opstellen van de kostenvolgorde van de combinaties is onmogelijk zonder een direct verband met de toename van het emissiereductiepercentage. Een verband tussen de marginale emissiereductiekosten en het emissiereductiepercentage is lastig te leggen. Het blijkt dat de schaal van emissiereductie de kosten minder sterk beïnvloedt dan de bronspecifieke product- en proceskenmerken, maar welke daarvoor bepalend zijn is onbekend. Aan de hand van de resultaten kan dus slechts een deel van de kosteninformatie worden aangedragen die wenselijk zou zijn om de kosten van strengere milieueisen per bron te voorspellen.

Het is mogelijk om met de informatie over twee bron-milieutechnologie combinaties in een verzameling, nauwkeurig te schatten hoe steil de marginale emissiereductiekostenfunctie zal zijn. Hiervoor is kosteninformatie nodig over een bron met zeer hoge en een bron met zeer lage marginale kosten; een proces met weinig product- en grondstofvariatie en veel emissie kent wellicht lage kosten terwijl er bij een complex proces met weinig emissie doorgaans hoge kosten zullen zijn. Voorts moeten het aantal typen emissiebronnen en de daarbij passende typen milieutechnologie bekend zijn waarmee het aantal mogelijke bron-milieutechnologie combinaties kan worden berekend. Op basis hiervan kan de exponent worden berekend en de steilheid van de emissiereductiekostenfunctie worden geschat. Hiermee kan de verdeling van de kosten in een verzameling worden aangegeven. Het belang hiervan is tweeledig. Ten eerste geeft de steilheid aan in hoeverre de 'gemiddelde' kosten op grond van enkele waarnemingen bij de bronnen maatgevend voor de andere bronnen zijn; dit is namelijk het geval als de kostenfunctie zeer vlak is. Een steile kostenfunctie betekent dat een deel van de bronnen veel hogere kosten moet maken dan de bemeten bronnen (tenzij per toeval een bron met zeer hoge kosten wordt bemeten). Ten tweede kan de overheid met behulp van de geschatte kostenfunctie uitrekenen hoe hoog de marginale emissiereductiekosten (maar niet de totale kosten) zullen toenemen

indien een emissiereductiepercentage wordt beoogd. Dit komt bijvoorbeeld goed van pas bij toepassingen van economische instrumenten zoals subsidies en heffingen.

De beperking blijft ten aanzien van de kostenvoorspelling van de marginale kosten per bron-milieutechnologie combinaties en het voorspellen van de totale kosten bij individuele emissiebronnen. Vooral dat laatste is van belang bij de beoordeling in hoeverre de kosten van milieutechnologie nog aanvaardbaar zijn. De schattingen op basis van exponenten zijn onvoldoende betrouwbaar om de emissiereductiekosten bij individuele bronnen te voorspellen. Dit komt omdat er geen direct verband is tussen de kosten en de schaal van emissiereductie, terwijl het verband tussen de kosten en product- en proceskenmerken onbekend is. Om de kosten bij de individuele bronnen indicatief te ramen, moeten de bronnen verdeeld worden in homogene clusters op grond van de bronspecifieke product- en proceskenmerken en type milieutechnologie. In de homogene clusters speelt schaalgrootte wel een rol, maar blijft het onzeker hoe sterk de andere bronspecifieke kenmerken de kosten beïnvloeden. Om te beoordelen in hoeverre milieueisen qua kosten acceptabel zijn, is het dus niet voldoende om kosteninformatie over enkele illustratief geachte bronnen te vergaren. Een betrouwbare beoordeling van de emissiereductiekosten bij bedrijven door strengere milieueisen noodzaakt om de kostendata per homogene cluster van bron-milieutechnologie combinaties te verzamelen maar ook dan zijn de emissiereductiekosten van individuele bronnen lastig te voorspellen omdat de variatie in product- en proceskenmerken groot is.